Fundamentos *de la* ciencia *e* ingeniería *de* materiales

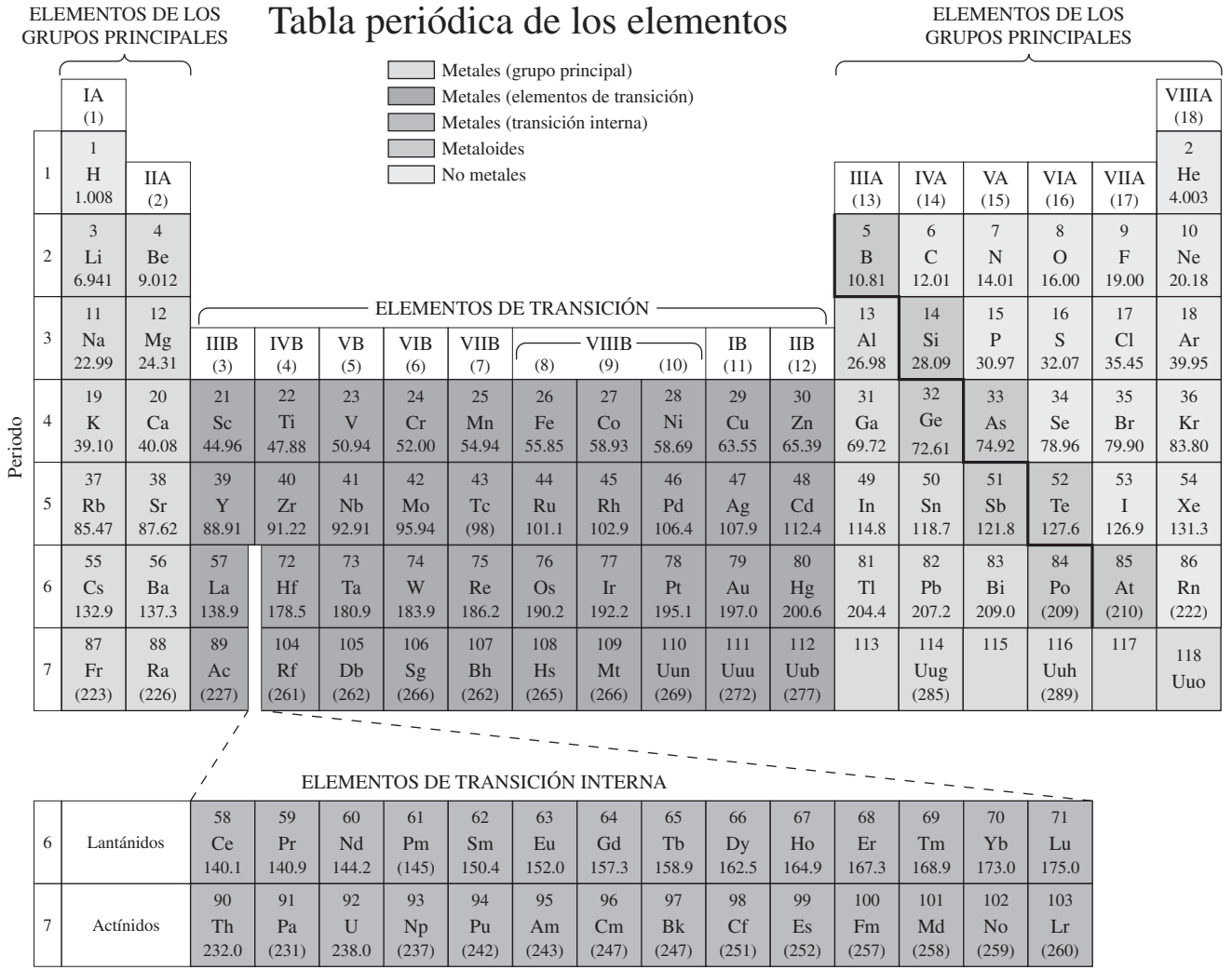
CUARTA EDICIÓN

WILLIAM F. SMITH

JAVAD HASHEMI

Mc Graw Hill

Tabla periódica de los elementos



Fuente: Davis, M., y Davis, R., *Fundamentals of Chemical Reaction Engineering,* McGraw-Hill, 2003.

Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales

Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales

Cuarta edición

William F. Smith
Profesor Emérito de Ingeniería
University of Central Florida

Javad Hashemi, PhD.
Profesor de Ingeniería Mecánica
Texas Tech University

Traducción
Gabriel Nagore Cázares
Pedro Alejandro González Caver
Traductores profesionales

Revisión técnica
Leonarda Carrillo Avilés
Profesora de Ciencia e Ingeniería de Materiales
Universidad Iberoamericana, Ciudad de México

José A. Bellido Velasco
Doctorado en Química Macromolecular
Escuela Politécnica Federal de Zurich, Suiza

MÉXICO • AUCKLAND • BOGOTÁ • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA
LISBOA • LONDRES • MADRID • MILÁN • MONTREAL • NUEVA DELHI
NUEVA YORK • SAN FRANCISCO • SAN JUAN • SAN LUIS
SANTIAGO • SIDNEY • SINGAPUR • TORONTO

Director Higher Education: Miguel Ángel Toledo Castellanos
Director editorial: Ricardo A. del Bosque Alayón
Editor sponsor: Pablo Eduardo Roig Vázquez
Editora de desarrollo: Paula Montaño González
Supervisor de producción: Zeferino García García

Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales
Cuarta edición

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra,
por cualquier medio, sin la autorización escrita del editor.

McGraw-Hill Interamericana

DERECHOS RESERVADOS © 2006 respecto de la primera edición en español por
McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S. A. DE C.V.
A Subsidiary of ***The McGraw-Hill*** *Companies, Inc.*

Edificio Punta Santa Fe
Prolongación Paseo de la Reforma 1015, Torre A
Piso 17, Colonia Desarrollo Santa Fe,
Delegación Álvaro Obregón
C.P. 01376, México, D.F.
Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana, Reg. Núm. 736.

Imagen de portada: Kelly Fassbinder/Imagine Design Studio

En un momento de descanso, el diseño innovador del palo de golf que aparece en la portada permite que la pelota descanse en un punto de 8 mm a partir del centro del palo, hacia el lado de golpeo. De esta forma el pivote golpea la pelota una fracción de segundo antes de que golpee al palo, lo que implica que este último no afecte la trayectoria. Makrolon © 2405 fue seleccionado como el material para este palo debido a su excelente fluidez y a que ofrece fuerza suficiente para que en la mayor parte de los casos los palos no se rompan cuando golpeen al pivote. En lugar de esto, simplemente salen volando, como se ilustra en la portada.

Bayer MaterialScience produce una amplia gama de materiales probados e innovadores, incluyendo policarbonatos, poliuretanos, poliuretanos termoplásticos, coberturas, adhesivos y selladores. Los materiales y soluciones de Bayer se emplean para diseñar la siguiente generación de productos en las industrias propias del automóvil, la construcción, las tecnologías de información, los electrodomésticos, el mobiliario, los deportes y el entretenimiento. Para obtener más información acerca de Bayer MaterialScience visite www.Bayermaterialsciencenafta.com, bien llame al 01-800-662-2927.

Library of Congress Cataloging-in Publication Data

ISBN 970-10-5638-8

Traducido de la cuarta edición de *FOUNDATIONS OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*
Copyright © MMVI by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved.
Previous editions © 1986, 1990, 1993, and 2004.

0-07-295358-6

1234567890 09875432106

Impreso en México *Printed in Mexico*

ACERCA DE LOS AUTORES

William F. Smith es profesor emérito de ingeniería en el Mechanical and Aerospace Engineering Department de la University of Central Florida en Orlando, Florida. Realizó sus estudios en ingeniería metalúrgica y obtuvo una maestría en ciencias de la Universidad de Purdue y un doctorado en ciencias en metalurgia en el Massachusetts Institute of Technology. El doctor Smith es ingeniero profesional registrado en los estados de California y Florida y ha estado impartiendo cursos de posgrado de ciencia e ingeniería de materiales, y escribiendo libros de texto durante varios años. Es el autor de *Structure and Properties of Engineering Alloy*s, segunda edición (McGraw-Hill, 1993).

Javad Hashemi es profesor de ingeniería mecánica en la Texas Tech University, donde ha enseñado introducción a la ciencia de materiales desde 1991. Obtuvo un doctorado en filosofía en ingeniería mecánica por la Universidad de Drexel en 1988. El doctor Hashemi ha estado impartiendo cursos de posgrado de materiales y mecánica, y también de laboratorios en la Texas Tech University. Además, es el creador principal de los módulos de laboratorio virtuales que acompañan a este libro como parte de un proyecto piloto realizado con fondos de la National Science Foundation. El enfoque de las investigaciones actuales del doctor Hashemi está en el campo de materiales, biomecánica y educación para ingenieros.

CONTENIDO

Prefacio xvii

CAPÍTULO **1**

Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2

1.1 Los materiales y la ingeniería 3
1.2 Ciencia e ingeniería de los materiales 6
1.3 Tipos de materiales 8
1.3.1 *Materiales metálicos 8*
1.3.2 *Materiales poliméricos 10*
1.3.3 *Materiales cerámicos 11*
1.3.4 *Materiales compuestos 13*
1.3.5 *Materiales electrónicos 15*
1.4 Competencia entre materiales 16
1.5 Avances recientes en la ciencia y tecnología de los materiales y tendencias futuras 18
1.5.1 *Materiales inteligentes 18*
1.5.2 *Nanomateriales 19*
1.6 Diseño y selección 20
1.7 Resumen 21
1.8 Definiciones 21
1.9 Problemas 22
1.10 Problemas en la selección de materiales y diseño 23

CAPÍTULO **2**

Estructura atómica y enlace 24

2.1 La estructura de los átomos 25
2.2 Números atómicos y masas atómicas 26
2.2.1 *Números atómicos 26*
2.2.2 *Masas atómicas 26*
2.3 La estructura electrónica de los átomos 29
2.3.1 *El átomo de hidrógeno 29*
2.3.2 *Números cuánticos de los electrones atómicos 33*
2.3.3 *Estructura electrónica de átomos multielectrónicos 35*
2.3.4 *Estructura electrónica y reactividad química 39*
2.4 Tipos de enlaces atómicos y enlaces moleculares 41
2.4.1 *Enlaces atómicos primarios 42*
2.4.2 *Enlaces atómicos secundarios y moleculares 42*
2.5 Enlace iónico 42
2.5.1 *Enlace iónico en general 42*
2.5.2 *Fuerzas interiónicas para un par de iones 43*
2.5.3 *Energías interiónicas para un par de iones 46*
2.5.4 *Disposición de los iones en sólidos iónicos 47*
2.5.5 *Energías de enlace de sólidos iónicos 48*
2.6 Enlace covalente 49
2.6.1 *Enlace covalente en la molécula de hidrógeno 49*
2.6.2 *Enlace covalente en otras moléculas diatómicas 50*
2.6.3 *Enlace covalente en el carbono 51*
2.6.4 *Enlace covalente en moléculas que contienen carbono 53*
2.6.5 *Benceno 53*
2.7 Enlace metálico 55
2.8 Enlaces secundarios 59
2.8.1 *Dipolos inducidos 60*
2.8.2 *Dipolos permanentes 61*
2.9 Enlaces mixtos 62
2.9.1 *Enlace mixto iónico-covalente 62*
2.9.2 *Enlace mixto metálico-covalente 63*
2.9.3 *Enlace mixto metálico iónico 64*
2.10 Resumen 64
2.11 Definiciones 65
2.12 Problemas 66
2.13 Problemas en la selección de materiales y diseño 70

CAPÍTULO **3**
Estructuras cristalinas y amorfas en los materiales 72

3.1 Las redes espaciales y la celda unitaria 73
3.2 Sistemas cristalinos y redes de Bravais 74
3.3 Principales estructuras cristalinas metálicas 75
3.3.1 *Estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC) 77*
3.3.2 *Estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC) 80*
3.3.3 *Estructura cristalina hexagonal compacta (HCP) 81*
3.4 Posiciones del átomo en celdas unitarias cúbicas 83
3.5 Direcciones en las celdas unitarias cúbicas 84
3.6 Índices de Miller para los planos cristalográficos en celdas unitarias cúbicas 88
3.7 Planos cristalográficos y direcciones en la estructura cristalina hexagonal 93
3.7.1 *Índices para los planos cristalinos en celdas unitarias HCP 93*
3.7.2 *Índices de dirección en las celdas unitarias HCP 94*
3.8 Comparación de las estructuras cristalinas FCC, HCP y BCC 96
3.8.1 *Estructuras cristalinas FCC y HCP 96*
3.8.2 *Estructura cristalina BCC 98*
3.9 Cálculos de la densidad volumétrica, planar y lineal de las celdas unitarias 98
3.9.1 *Densidad volumétrica 98*
3.9.2 *Densidad atómica planar 99*
3.9.3 *Densidad atómica lineal 101*
3.10 Polimorfismo o alotropía 102
3.11 Análisis de las estructuras cristalinas 103
3.11.1 *Fuentes de rayos X 104*
3.11.2 *Difracción de rayos X 105*
3.11.3 *Análisis por difracción de rayos X de las estructuras cristalinas 107*
3.12 Materiales amorfos 113
3.13 Resumen 114
3.14 Definiciones 115
3.15 Problemas 116
3.16 Problemas en la selección de materiales y diseño 122

CAPÍTULO **4**
Solidificación e imperfecciones cristalinas 124

4.1 Solidificación de metales 125
4.1.1 *Formación de núcleos estables en metales líquidos 127*
4.1.2 *Crecimiento de cristales de un metal líquido y formación de una estructura granular 132*
4.1.3 *Estructura granular de las fundiciones industriales 133*
4.2 Solidificación de monocristales 134
4.3 Soluciones sólidas metálicas 138
4.3.1 *Soluciones sólidas sustitucionales 139*
4.3.2 *Soluciones sólidas intersticiales 141*
4.4 Imperfecciones cristalinas 143
4.4.1 *Defectos puntuales 143*
4.4.2 *Defectos lineales (dislocaciones) 144*
4.4.3 *Defectos planares 147*
4.4.4 *Defectos volumétricos 150*
4.5 Técnicas experimentales para la identificación de microestructuras y defectos 151
4.5.1 *Metalografía óptica, tamaño de grano según la ASTM y determinación del diámetro de grano 151*
4.5.2 *Microscopia electrónica de barrido (SEM) 156*
4.5.3 *Microscopia electrónica de transmisión (TEM) 158*
4.5.4 *Microscopia electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM) 159*
4.5.5 *Microscopios de sonda de barrido y resolución atómica 161*
4.6 Resumen 166
4.7 Definiciones 166
4.8 Problemas 168
4.9 Problemas en la selección de materiales y diseño 170

CAPÍTULO **5**
Procesos activados por temperatura y difusión en los sólidos 172

5.1 Cinética en los procesos sólidos 173
5.2 Difusión atómica en sólidos 177
5.2.1 *Difusión en sólidos en general 177*
5.2.2 *Mecanismos de la difusión 177*
5.2.3 *Difusión en estado estacionario 180*
5.2.4 *Difusión en estado no estacionario 182*
5.3 Aplicaciones industriales de los procesos de difusión 184
5.3.1 *Endurecimiento superficial del acero por carburización con gas 184*
5.3.2 *Difusión de impurezas en obleas de silicio para circuitos integrados 188*
5.4 Efecto de la temperatura en la difusión en los sólidos 191
5.5 Resumen 195
5.6 Definiciones 195
5.7 Problemas 196
5.8 Problemas en la selección de materiales y diseño 198

CAPÍTULO **6**
Propiedades mecánicas de metales I 200

6.1 El proceso de metales y aleaciones 201
6.1.1 *La fundición de metales y aleaciones 201*
6.1.2 *Laminación en caliente y en frío de metales y aleaciones 203*
6.1.3 *Extrusión de metales y aleaciones 208*
6.1.4 *Forja 209*
6.1.5 *Otros procesos de conformado de metales 211*
6.2 Tensión y deformación en metales 212
6.2.1 *Deformación elástica y plástica 213*
6.2.2 *Tensión de ingeniería y deformación convencional 213*
6.2.3 *Coeficiente de Poisson 216*
6.2.4 *Tensión de cizalladura y deformación de cizalladura 216*
6.3 El ensayo de tracción y el diagrama-tensión de formación convencional 217
6.3.1 *Valores de propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de tracción y del diagrama tensión-deformación convencional 220*
6.3.2 *Comparación de curvas tensión-deformación convencional para algunas aleaciones seleccionadas 225*
6.3.3 *Tensión real y deformación real 225*
6.4 Dureza y ensayo de dureza 227
6.5 Deformación plástica de monocristales metálicos 229
6.5.1 *Bandas de deslizamiento en líneas de deslizamiento en la superficie de cristales metálicos 229*
6.5.2 *Deformación plástica de cristales metálicos por el mecanismo de deslizamiento 232*
6.5.3 *Sistemas de deslizamiento 234*
6.5.4 *Tensión de cizalladura crítica en monocristales metálicos 235*
6.5.5 *Ley de Schmid 237*
6.5.6 *Maclado 240*
6.6 Deformación plástica de metales policristalinos 242
6.6.1 *Efecto de los límites de grano sobre la resistencia de los metales 242*
6.6.2 *Efecto de la deformación plástica en la forma de los granos y en el ordenamiento de dislocaciones 244*
6.6.3 *Efecto de la deformación plástica en frío en el incremento de la resistencia de los metales 246*
6.7 Endurecimiento de los metales por disolución sólida 247
6.8 Recuperación y recristalización de los metales deformados plásticamente 249
6.8.1 *Estructura de un metal fuertemente deformado en frío antes del tratamiento térmico 250*
6.8.2 *Recuperación 251*
6.8.3 *Recristalización 252*
6.9 Superplasticidad en metales 257
6.10 Metales nanocristalinos 259
6.11 Resumen 261
6.12 Definiciones 262
6.13 Problemas 263
6.14 Problemas en la selección de materiales y diseño 268

CAPÍTULO **7**
Propiedades mecánicas de metales II 270

7.1 Fractura de los metales 271
7.1.1 *Fractura dúctil 272*
7.1.2 *Fractura frágil 273*
7.1.3 *Tenacidad y prueba de impacto 276*
7.1.4 *Temperatura de transición de dúctil a frágil 276*
7.1.5 *Resistencia a la fractura 279*
7.2 Fatiga de los metales 281
7.2.1 *Esfuerzos cíclicos 285*
7.2.2 *Cambios estructurales básicos que tienen lugar en un metal dúctil durante el proceso de fatiga 286*
7.2.3 *Factores de importancia que afectan la resistencia a la fatiga de los metales 287*
7.3 Velocidad de propagación de las fisuras por fatiga 288
7.3.1 *Correlación entre la propagación de la fisura por fatiga con esfuerzo y la longitud de la fisura 288*
7.3.2 *Representación gráfica de la velocidad de crecimiento de fisuras por fatiga* versus *el factor intensidad-esfuerzos 290*
7.3.3 *Cálculos de los ciclos de resistencia a la fatiga 292*
7.4 Fluencia y esfuerzo de ruptura en los metales 294
7.4.1 *La fluencia en los metales 294*
7.4.2 *La prueba de fluencia 296*
7.4.3 *Prueba de ruptura por fluencia 297*
7.5 Representación gráfica de datos de fluencia y esfuerzo-tiempo de ruptura-temperatura utilizando el parámetro de Larsen-Miller 298
7.6 Caso para el estudio de fallas en componentes metálicos 300
7.7 Adelantos recientes y perspectivas en la optimización del desempeño mecánico de metales 303
7.7.1 *Optimización simultánea de la ductilidad y la resistencia 303*
7.7.2 *Comportamiento de fatiga en metales nanocristalinos 305*
7.8 Resumen 305
7.9 Definiciones 306
7.10 Problemas 307
7.11 Problemas en la selección de materiales y diseño 309

CAPÍTULO **8**
Diagramas de fase 310

8.1 Diagramas de fase de sustancias puras 311
8.2 Regla de las fases de Gibbs 313
8.3 Curvas de enfriamiento 314
8.4 Sistemas de aleaciones binarias isomórficas 315
8.5 Regla de la palanca 318
8.6 Solidificación fuera del equilibrio de las aleaciones 322
8.7 Sistemas de aleaciones binarias eutécticas 326
8.8 Sistemas de aleaciones binarias peritécticas 333
8.9 Sistemas binarios monotécticos 338
8.10 Reacciones invariantes 339
8.11 Diagramas de fases con fases y compuestos intermedios 341
8.12 Diagramas de fases ternarios 345
8.13 Resumen 348
8.14 Definiciones 349
8.15 Problemas 351
8.16 Problemas en la selección de materiales y diseño 355

CAPÍTULO **9**
Aleaciones para ingeniería 358

9.1 Producción de hierro y acero 360
9.1.1 *Producción de arrabio en un alto horno 360*
9.1.2 *Fabricación de acero y procesamiento de formas importantes de productos de ese material 361*
9.2 El sistema hierro-carbono 363
9.2.1 *Diagrama de fases hierro-hierro-carburo 363*
9.2.2 *Fases sólidas en el diagrama de fases de Fe-Fe_3C 363*
9.2.3 *Reacciones invariantes en el diagrama de fases Fe-Fe_3C 364*
9.2.4 *Enfriamiento lento de aceros al carbono simples 366*

9.3 Tratamiento calórico de aceros al carbono simples 373
9.3.1 *Martensita 373*
9.3.2 *Descomposición isotérmica de la austenita 378*
9.3.3 *Diagrama de transformación por enfriamiento continuo para un acero al carbono simple eutectoide 383*
9.3.4 *Recocido y normalización de aceros al carbono simples 386*
9.3.5 *Revenido de aceros al carbono simples 387*
9.3.6 *Clasificación y propiedades mecánicas típicas de aceros al carbono simples 391*
9.4 Aceros de baja aleación 392
9.4.1 *Clasificación de aceros de aleación 392*
9.4.2 *Distribución de los elementos contenidos en los aceros de aleación 394*
9.4.3 *Efectos de los elementos contenidos en una aleación sobre la temperatura eutectoide de los aceros 395*
9.4.4 *Templabilidad 396*
9.4.5 *Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de aceros de baja aleación 401*
9.5 Aleaciones de aluminio 401
9.5.1 *Endurecimiento por precipitación (endurecimiento) 403*
9.5.2 *Propiedades generales del aluminio y su producción 410*
9.5.3 *Aleaciones de aluminio forjado 411*
9.5.4 *Aleaciones de fundición de aluminio 416*
9.6 Aleaciones de cobre 418
9.6.1 *Propiedades generales del cobre 418*
9.6.2 *Producción del cobre 419*
9.6.3 *Clasificación de las aleaciones de cobre 419*
9.6.4 *Aleaciones de cobre forjado 422*
9.7 Aceros inoxidables 424
9.7.1 *Aceros inoxidables ferríticos 424*
9.7.2 *Aceros inoxidables martensíticos 425*
9.7.3 *Aceros inoxidables austeníticos 427*
9.8 Hierros fundidos 429
9.8.1 *Propiedades generales 429*
9.8.2 *Tipos de hierros fundidos 429*
9.8.3 *Hierro fundido blanco 429*
9.8.4 *Hierro fundido gris 431*
9.8.5 *Hierros fundidos dúctiles 432*
9.8.6 *Hierros fundidos maleables 435*
9.9 Aleaciones de magnesio, titanio y níquel 436
9.9.1 *Aleaciones de magnesio 436*
9.9.2 *Aleaciones de titanio 438*
9.9.3 *Aleaciones de níquel 440*
9.10 Aleaciones para propósitos especiales y sus aplicaciones 441
9.10.1 *Intermetálicos 441*
9.10.2 *Aleaciones con memoria de forma 442*
9.10.3 *Metales amorfos 446*
9.11 Metales en aplicaciones biomédicas: biometales 448
9.11.1 *Aceros inoxidables 449*
9.11.2 *Aleaciones a base de cobalto 449*
9.11.3 *Aleaciones de titanio 451*
9.12 Algunos puntos a considerar sobre la aplicación ortopédica de los metales 452
9.13 Resumen 454
9.14 Definiciones 455
9.15 Problemas 457
9.16 Problemas en la selección de materiales y diseño 465

CAPÍTULO **10**
Materiales poliméricos 468

10.1 Introducción 469
10.1.1 *Termoplástico 470*
10.1.2 *Plásticos termofijos 470*
10.2 Reacciones de polimerización 471
10.2.1 *Estructura del enlace covalente de una molécula de etileno 471*
10.2.2 *Estructura del enlace covalente de una molécula de etileno activada 472*
10.2.3 *Reacción general para la polimerización de polietileno y grado de polimerización 473*
10.2.4 *Pasos de la polimerización en cadena 473*
10.2.5 *Peso molecular promedio de los termoplásticos 475*

10.2.6 *Funcionalidad de un monómero 476*
10.2.7 *Estructura de los polímeros lineales no cristalinos 476*
10.2.8 *Polímeros de vinilo y vinilideno 478*
10.2.9 *Homopolímeros y copolímeros 479*
10.2.10 *Otros métodos de polimerización 482*
10.3 Métodos industriales de polimerización 484
10.4 Cristalinidad y estereoisomerismo en algunos termoplásticos 486
10.4.1 *Solidificación de termoplásticos no cristalinos 486*
10.4.2 *Solidificación de termoplásticos parcialmente cristalinos 486*
10.4.3 *Estructura de los materiales termoplásticos parcialmente cristalinos 488*
10.4.4 *Estereoisomerismo en los termoplásticos 489*
10.4.5 *Catalizadores de Ziegler y Natta 490*
10.5 Procesado de los materiales plásticos 491
10.5.1 *Procesos utilizados con los materiales termoplásticos 492*
10.5.2 *Procesos utilizados con los materiales termofijos 496*
10.6 Termoplásticos de uso general 498
10.6.1 *Politeileno 500*
10.6.2 *Policloruro de vinilo y copolímeros 503*
10.6.3 *Polipropileno 505*
10.6.4 *Poliestireno 505*
10.6.5 *Poliacrilonitrilo 506*
10.6.6 *Estireno-acrilonitrilo (SAN) 507*
10.6.7 *ABS 507*
10.6.8 *Polimetil metacrilato (PMMA) 509*
10.6.9 *Fluoroplásticos 510*
10.7 Termoplásticos de ingeniería 511
10.7.1 *Poliamidas (nailon) 512*
10.7.2 *Policarbonato 515*
10.7.3 *Resinas de fenileno a base de óxido 516*
10.7.4 *Acetales 517*
10.7.5 *Poliésteres termoplásticos 518*
10.7.6 *Sulfuro de polifenileno 519*
10.7.7 *Polieterimida 520*
10.7.8 *Aleaciones de polímeros 521*
10.8 Plásticos no deformables por calor (termofijos) 521
10.8.1 *Fenólicos 523*
10.8.2 *Resinas epóxicas 525*
10.8.3 *Poliésteres insaturados 527*
10.8.4 *Resinas amínicas (ureas y melaminas) 529*
10.9 Elastómeros (cauchos) 531
10.9.1 *Caucho natural 531*
10.9.2 *Cauchos sintéticos 534*
10.9.3 *Propiedades de los elastómeros de policloropreno 536*
10.9.4 *Vulcanización de los elastómeros de policloropreno 536*
10.10 Deformación y refuerzo de los materiales plásticos 539
10.10.1 *Mecanismos de deformación para los termoplásticos 539*
10.10.2 *Refuerzo de los termoplásticos 541*
10.10.3 *Refuerzo de plásticos termofijos 545*
10.10.4 *Efecto de la temperatura sobre la resistencia de los materiales plásticos 545*
10.11 Fluencia y fractura de los materiales poliméricos 546
10.11.1 *Fluencia de los materiales poliméricos 546*
10.11.2 *Relajación de esfuerzos de los materiales poliméricos 547*
10.11.3 *Fractura de los materiales poliméricos 550*
10.12 Polímeros en aplicaciones biomédicas: biopolímeros 552
10.12.1 *Aplicaciones cardiovasculares de los polímeros 553*
10.12.2 *Aplicaciones oftálmicas 554*
10.12.3 *Sistemas de administración de medicamentos 555*
10.12.4 *Materiales de sutura 556*
10.12.5 *Aplicaciones ortopédicas 556*
10.13 Resumen 557
10.14 Definiciones 558
10.15 Problemas 560
10.16 Problemas en la selección de materiales y diseño 570

CAPÍTULO **11**
Cerámicas 572

11.1 Introducción 573
11.2 Estructuras cristalinas de cerámicas simples 575
11.2.1 *Enlace iónico y covalente en compuestos cerámicos simples 575*
11.2.2 *Distribuciones iónicas sencillas que se encuentran en sólidos enlazados iónicamente 576*
11.2.3 *Estructura cristalina del cloruro de cesio (CsCl) 579*
11.2.4 *Estructura cristalina del cloruro de sodio (NaCl) 580*
11.2.5 *Espacios intersticiales en redes cristalinas FCC y HCP 584*
11.2.6 *Estructura cristalina de blenda de zinc (ZnS) 586*
11.2.7 *Estructura cristalina del fluoruro de calcio (CaF_2) 588*
11.2.8 *Estructura cristalina de la antifluorita 590*
11.2.9 *Estructura cristalina del corindón (Al_2O_3) 590*
11.2.10 *Estructura cristalina del espinel ($MgAl_2O_4$) 590*
11.2.11 *Estructura cristalina de la perovskita ($CaTiO_3$) 590*
11.2.12 *El carbono y sus alótropos 591*
11.3 Estructuras de silicatos 595
11.3.1 *Unidad estructural básica de las estructuras de silicatos 595*
11.3.2 *Estructuras insular, cadena y anillo de silicatos 595*
11.3.3 *Estructuras laminares de silicatos 595*
11.3.4 *Redes de silicato 597*
11.4 Procesamiento de cerámicas 598
11.4.1 *Preparación de materiales 599*
11.4.2 *Moldeado 599*
11.4.3 *Tratamientos térmicos 604*
11.5 Cerámicas tradicionales y de ingeniería 606
11.5.1 *Cerámicas tradicionales 606*
11.5.2 *Cerámicas de ingeniería 609*
11.6 Propiedades mecánicas de las cerámicas 611
11.6.1 *Generalidades 611*
11.6.2 *Mecanismos para la deformación de materiales cerámicos 611*
11.6.3 *Factores que afectan la resistencia de los materiales cerámicos 612*
11.6.4 *Tenacidad de los materiales cerámicos 613*
11.6.5 *Reforzamiento de la tenacidad de la circonia parcialmente estabilizada (PSZ) 615*
11.6.6 *Falla por fatiga de cerámicos 615*
11.6.7 *Materiales abrasivos cerámicos 617*
11.7 Propiedades térmicas de las cerámicas 618
11.7.1 *Materiales cerámicos refractarios 619*
11.7.2 *Refractarios ácidos 620*
11.7.3 *Refractarios básicos 620*
11.7.4 *Losetas cerámicas aislantes para el transbordador espacial 620*
11.8 Vidrios 620
11.8.1 *Definición de vidrio 622*
11.8.2 *Temperatura de transición vítrea 622*
11.8.3 *Estructura de los vidrios 623*
11.8.4 *Composición de diversos vidrios 624*
11.8.5 *Deformación viscosa de vidrios 626*
11.8.6 *Métodos de formacion para vidrios 628*
11.8.7 *Vidrio templado 630*
11.8.8 *Vidrio reforzado químicamente 630*
11.9 Recubrimientos cerámicos e ingeniería de superficies 632
11.9.1 *Vidrios de silicato 632*
11.9.2 *Óxidos y carburos 632*
11.10 Cerámicas en aplicaciones biomédicas 634
11.10.1 *La alúmina en implantes ortopédicos 634*
11.10.2 *La alúmina en implantes dentales 636*
11.10.3 *Conectividad de implantes cerámicos y tejidos 636*
11.11 Nanotecnología y cerámica 637
11.12 Resumen 639
11.13 Definiciones 640
11.14 Problemas 642
11.15 Problemas en la selección de materiales y diseño 646

CAPÍTULO **12**
Materiales compuestos 648

12.1 Introducción 649
12.2 Fibras para materiales compuestos de plástico reforzado 651
12.2.1 *Fibras de vidrio para reforzar resinas de plástico 651*
12.2.2 *Fibras de carbono para plásticos reforzados 653*
12.2.3 *Fibras de aramida para reforzar resinas de plástico 654*
12.2.4 *Comparación de las propiedades mecánicas de las fibras de carbono, aramida y vidrio para materiales compuestos de plástico reforzado 655*
12.3 Materiales compuestos de plástico reforzado con fibra 657
12.3.1 *Materiales matriz para materiales compuestos de plástico reforzado con fibra 657*
12.3.2 *Materiales compuestos de plásticos reforzados con fibras 658*
12.3.3 *Ecuaciones para el módulo elástico de un compuesto laminar con matriz de plástico reforzada con fibras continuas en condiciones de isodeformación e isoesfuerzos 662*
12.4 Procesos de molde abierto para materiales compuestos de plástico reforzado con fibra 667
12.4.1 *Proceso de colocación manual de capas 667*
12.4.2 *Proceso de aspersión 667*
12.4.3 *Proceso de bolsa de vacío en autoclave 668*
12.4.4 *Proceso de embobinado del filamento 670*
12.5 Procesos de molde cerrado para materiales compuestos de plástico reforzado con fibra 672
12.5.1 *Moldeo por compresión e inyección 672*
12.5.2 *El proceso del compuesto para moldeo de placas (CMP) 672*
12.5.3 *Proceso de pultrusión continua 674*
12.6 Concreto 674
12.6.1 *Cemento portland 675*
12.6.2 *Agua para mezclar con el concreto 678*
12.6.3 *Agregados para concreto 679*
12.6.4 *Oclusión de aire 679*
12.6.5 *Resistencia del concreto a la compresión 679*
12.6.6 *Proporciones de las mezclas de concreto 679*
12.6.7 *Concreto armado y preesforzado 682*
12.6.8 *Concreto preesforzado 683*
12.7 Asfalto y mezclas de asfalto 684
12.8 Madera 685
12.8.1 *Macroestructura de la madera 685*
12.8.2 *Microestructura de las maderas blandas 688*
12.8.3 *Microestructura de las maderas duras 689*
12.8.4 *Ultraestructura de la pared celular 690*
12.8.5 *Propiedades de madera 692*
12.9 Estructuras multicapas 695
12.9.1 *Estructura tipo sándwich con panal 695*
12.9.2 *Estructuras metálicas recubiertas 695*
12.10 Compuestos con matriz de metal y matriz de cerámica 696
12.10.1 *Compuestos con matriz de metal (CMM) 696*
12.10.2 *Compuestos con matriz de cerámica (CMC) 700*
12.10.3 *Compuestos de cerámica y nanotecnología 703*
12.11 Hueso: un material compuesto natural 703
12.11.1 *Composición 703*
12.11.2 *Macroestructura 703*
12.11.3 *Propiedades mecánicas 705*
12.11.4 *Biomecánica de la fractura de un hueso 706*
12.11.5 *Viscoelasticidad del hueso 707*
12.11.6 *Remodelación del hueso 707*
12.11.7 *Nanotecnología y reparación de huesos 708*
12.12 Resumen 708
12.13 Definiciones 709
12.14 Problemas 712
12.15 Problemas en la selección de materiales y diseño 716

CAPÍTULO **13**
Corrosión 718

13.1 Aspectos generales 719
13.2 Corrosión electroquímica de los metales 720
13.2.1 *Reacciones oxidación-reducción 720*
13.2.2 *Electrodo estándar de potencial de media celda para metales 722*

13.3 Celdas galvánicas 724
- **13.3.1** *Celdas galvánicas macroscópicas con electrolitos con concentración uno molar 724*
- **13.3.2** *Celdas galvánicas con electrolitos que no son de concentración uno molar 726*
- **13.3.3** *Celdas galvánicas con electrolitos ácidos o alcalinos sin iones metálicos presentes 727*
- **13.3.4** *Corrosión microscópica de celdas galvánicas en un electrodo 729*
- **13.3.5** *Celdas galvánicas de concentración 730*
- **13.3.6** *Celdas galvánicas creadas por diferencias en la composición, estructura y esfuerzo 733*

13.4 Velocidades (cinética) de la corrosión 735
- **13.4.1** *Velocidad de la corrosión uniforme o electrodepositación de un metal en una solución acuosa 736*
- **13.4.2** *Reacciones de corrosión y de polarización 739*
- **13.4.3** *Pasivación 742*
- **13.4.4** *La serie galvánica 743*

13.5 Tipos de corrosión 745
- **13.5.1** *Ataque corrosivo uniforme o general 745*
- **13.5.2** *Corrosión de dos metales o galvánica 745*
- **13.5.3** *Corrosión por picaduras 746*
- **13.5.4** *Corrosión por agrietamiento 749*
- **13.5.5** *Corrosión intergranular 751*
- **13.5.6** *Corrosión por esfuerzo 753*
- **13.5.7** *Corrosión por erosión 756*
- **13.5.8** *Daño por cavitación 756*
- **13.5.9** *Corrosión por desgaste 757*
- **13.5.10** *Fugas selectivas 757*
- **13.5.11** *Daño por hidrógeno 758*

13.6 Oxidación de metales 759
- **13.6.1** *Películas de óxido protectoras 759*
- **13.6.2** *Mecanismo de oxidación 761*
- **13.6.3** *Velocidad de oxidación (cinética) 762*

13.7 Control de la corrosión 764
- **13.7.1** *Selección de materiales 764*
- **13.7.2** *Recubrimientos 765*
- **13.7.3** *Diseño 766*
- **13.7.4** *Alteración del ambiente 767*
- **13.7.5** *Protección anódica y catódica 768*

13.8 Resumen 770

13.9 Definiciones 770

13.10 Problemas 771

13.11 Problemas en la selección de materiales y diseño 776

CAPÍTULO **14**

Propiedades eléctricas de materiales 778

14.1 Conducción eléctrica en metales 779
- **14.1.1** *El modelo clásico de la conducción eléctrica en metales 779*
- **14.1.2** *Ley de Ohm 781*
- **14.1.3** *Velocidad de arrastre de electrones en un metal conductor 785*
- **14.1.4** *Resistividad eléctrica de metales 786*

14.2 Modelo de bandas de energía para la conducción eléctrica 790
- **14.2.1** *Modelo de bandas de energía para metales 790*
- **14.2.2** *Modelo de bandas de energía para aislantes 792*

14.3 Semiconductores intrínsecos 792
- **14.3.1** *El mecanismo de la conducción eléctrica en semiconductores intrínsecos 792*
- **14.3.2** *Transporte de carga eléctrica en la red cristalina de silicio puro 793*
- **14.3.3** *Diagrama de bandas de energía para semiconductores elementales intrínsecos 794*
- **14.3.4** *Relaciones cuantitativas para la conducción eléctrica en semiconductores intrínsecos elementales 795*
- **14.3.5** *Efecto de la temperatura en la semiconductividad intrínseca 797*

14.4 Semiconductores extrínsecos 799
- **14.4.1** *Semiconductores extrínsecos tipo n (tipo negativo) 799*
- **14.4.2** *Semiconductores extrínsecos tipo p (tipo positivo) 801*
- **14.4.3** *Impurificación de material semiconductor de silicio extrínseco 803*
- **14.4.4** *Efecto de la impurificación en concentraciones de portadores en semiconductores extrínsecos 803*

14.4.5 *Efecto de la concentración de impurezas ionizadas total en la movilidad de portadores de carga en silicio a temperatura ambiente 806*
14.4.6 *Efecto de la temperatura en la conductividad eléctrica de semiconductores extrínsecos 807*
14.5 Dispositivos semiconductores 809
14.5.1 *La unión pn 810*
14.5.2 *Algunas aplicaciones de los diodos de unión pn 813*
14.5.3 *El transistor de unión bipolar 815*
14.6 Microelectrónica 816
14.6.1 *Transistores bipolares planos microelectrónicos 818*
14.6.2 *Transistores de efecto de campo planos microelectrónicos 819*
14.6.3 *Fabricación de circuitos integrados microelectrónicos 821*
14.7 Semiconductores compuestos 828
14.8 Propiedades eléctricas de cerámicas 831
14.8.1 *Propiedades básicas de los dieléctricos 831*
14.8.2 *Materiales aisladores cerámicos 834*
14.8.3 *Materiales cerámicos para capacitores 835*
14.8.4 *Semiconductores cerámicos 836*
14.8.5 *Cerámicas ferroeléctricas 838*
14.9 Nanoelectrónica 841
14.10 Resumen 842
14.11 Definiciones 843
14.12 Problemas 846
14.13 Problemas en la selección de materiales y diseño 850

CAPÍTULO **15**
Propiedades ópticas y materiales superconductores 852

15.1 Introducción 853
15.2 La luz y el espectro electromagnético 853
15.3 Refracción de la luz 856
15.3.1 *Índice de refracción 856*
15.3.2 *Ley de Snell de la refracción de la luz 857*
15.4 Absorción, transmisión y reflexión de la luz 859
15.4.1 *Metales 859*
15.4.2 *Vidrios de silicato 859*
15.4.3 *Plásticos 862*
15.4.4 *Semiconductores 862*
15.5 Luminiscencia 863
15.5.1 *Fotoluminiscencia 864*
15.5.2 *Catodoluminiscencia 864*
15.6 Radiación de emisión estimulada y láser 866
15.6.1 *Tipos de láser 868*
15.7 Fibras ópticas 870
15.7.1 *Pérdidas de luz en fibras ópticas 870*
15.7.2 *Fibras ópticas unimodo y multimodo 871*
15.7.3 *Fabricación de fibras ópticas 872*
15.7.4 *Sistemas modernos de comunicación de fibra óptica 874*
15.8 Materiales superconductores 875
15.8.1 *El estado superconductor 875*
15.8.2 *Propiedades magnéticas de superconductores 876*
15.8.3 *Flujo de corriente y campos magnéticos en superconductores 878*
15.8.4 *Superconductores de alto campo y alta corriente 879*
15.8.5 *Óxidos superconductores de alta temperatura crítica (T_c) 881*
15.9 Definiciones 883
15.10 Problemas 884
15.11 Problemas en la selección de materiales y diseño 886

CAPÍTULO **16**
Propiedades magnéticas 888

16.1 Introducción 889
16.2 Campos y cantidades magnéticas 889
16.2.1 *Campos magnéticos 889*
16.2.2 *Inducción magnética 892*
16.2.3 *Permeabilidad magnética 892*
16.2.4 *Susceptibilidad magnética 894*

16.3 Tipos de magnetismo 894
16.3.1 *Diamagnetismo 895*
16.3.2 *Paramagnetismo 895*
16.3.3 *Ferromagnetismo 895*
16.3.4 *Momento magnético de un electrón del átomo no apareado 897*
16.3.5 *Antiferromagnetismo 899*
16.3.6 *Ferrimagnetismo 899*
16.4 Efecto de la temperatura en el ferromagnetismo 899
16.5 Dominios ferromagnéticos 900
16.6 Tipos de energías que determinan la estructura de dominios ferromagnéticos 902
16.6.1 *Energía de intercambio 902*
16.6.2 *Energía magnetoestática 903*
16.6.3 *Energía de anisotropía magnetocristalina 903*
16.6.4 *Energía de la pared del dominio 904*
16.6.5 *Energía magnetoestrictiva 905*
16.7 La magnetización y desmagnetización de un metal ferromagnético 907
16.8 Materiales magnéticos blandos 908
16.8.1 *Propiedades deseables de materiales magnéticos blandos 909*
16.8.2 *Pérdidas de energía para materiales magnéticos blandos 909*
16.8.3 *Aleaciones de hierro-silicio 910*
16.8.4 *Vidrios metálicos 911*
16.8.5 *Aleaciones de níquel-hierro 912*
16.9 Materiales magnéticos duros 915
16.9.1 *Propiedades de materiales magnéticos duros 915*
16.9.2 *Aleaciones de alnico 917*
16.9.3 *Aleaciones de tierras raras 919*
16.9.4 *Aleaciones magnéticas de niodimio-hierro-boro 921*
16.9.5 *Aleaciones magnéticas de hierro-cromo-cobalto 921*
16.10 Ferritas 923
16.10.1 *Ferritas magnéticamente blandas 923*
16.10.2 *Ferritas magnéticamente duras 928*
16.11 Resumen 928
16.12 Definiciones 929
16.13 Problemas 932
16.14 Problemas en la selección de materiales y diseño 936

APÉNDICE **I**
Propiedades importantes de materiales de ingeniería seleccionados 937

APÉNDICE **II**
Algunas propiedades de elementos seleccionados 992

APÉNDICE **III**
Radios iónicos de los elementos 994

APÉNDICE **IV**
Cantidades físicas selectas y sus unidades 997

Referencias para estudios adicionales por capítulo 999

Glosario 1002

Respuestas a problemas seleccionados 1013

Índice analítico 1016

PREFACIO

La cuarta edición de *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* está diseñada para un primer curso en ciencia e ingeniería de materiales de estudiantes de esta especialidad. Tomando en cuenta que esta podría ser la primera exposición de la ciencia de materiales a los estudiantes, el libro presenta los temas esenciales de manera clara y concisa, sin detalles extraños que agobien a los recién llegados. Se recurre a ejemplos industriales y fotografías a lo largo del libro para dar a los estudiantes una visión relativa a las muy diversas maneras en que la ciencia e ingeniería de materiales se aplica en el mundo real.

NUEVAS CARACTERÍSTICAS DE LA CUARTA EDICIÓN

Además de su ya renombrado estilo de redacción amigable para los estudiantes y de las aplicaciones industriales, la cuarta edición ofrece nuevas características que incluyen una cobertura completa de los temas de la moderna ciencia de materiales que preparan a los estudiantes para la vida fuera del aula.
Las nuevas secciones son:

- Nuevas referencias a materiales/dispositivos inteligentes, SMEM y nanomateriales (1.1)
- Nueva referencia a superaleaciones y sus aplicaciones biomédicas (1.3)
- Discusión añadida de plásticos de ingeniería y aplicaciones en automóviles (1.3.2)
- Discusión añadida de cerámicas de ingeniería y aplicaciones (1.3.3)
- Discusión añadida de materiales compuestos (1.3.4)
- Nueva cobertura de materiales inteligentes y nanomateriales (1.5)
- Nueva sección acerca de un estudio de caso simplificado de selección de materiales para el armazón y la horquilla de una bicicleta (1.6)
- Se agregó una nueva cobertura de materiales amorfos en el capítulo 3
- Referencias añadidas de orden de alcance largo y corto (SRO conocidos también como materials amorfos) (3.1)
- El capítulo 4 se dividó en los capítulos 4 y 5 en la cuarta edición para que la difusión pudiera cubrirse en un solo capítulo
- Se agregó una cobertura de microscopios al final del capítulo 4
- Se agregó una cobertura sobre defectos planos y fronteras gemelas (4.4.3)
- Nueva sección acerca de defectos de volumen (4.4.4)
- Nueva sección acerca de técnicas experimentales para la identificación de microestructura y defectos (4.5)
- Cobertura añadida de metales de grano fino y la ecuación de Hall-Petch en el capítulo 6
- Nuevo estudio de caso en fallas y cobertura de avances reciente en el mejoramimento del despeño mecánico en el capítulo 7

- Cobertura añadida de fallas y fractura de metales (7.1)
- Nueva sección acerca de la temperatura de transición de dúctil a quebradizo (7.1.4)
- Nueva sección acerca de avances recientes y direcciones futuras en el mejoramiento del desempeño mecánico de metales (7.7)
- Nueva cobertura de curvas de enfriamiento en el capítulo 8
- Cobertura agregada de compuestos intermedios (8.11.1)
- Se han agregado en el capítulo 9 tres nuevas secciones dedicadas a aleaciones avanzadas y sus aplicaciones en ingeniería biomédica
- Se agregó al capítulo 10 una nueva sección dedicada a aplicaciones biomédicas de materiales poliméricos
- Nueva sección con cobertura de balones de fulerenos y nanotubos de carbono (11.2.12)
- Nueva sección acerca de recubrimientos cerámicos e ingeniería de superficies (11.9)
- Nueva sección sobre cerámicas en aplicaciones biomédicas (11.10)
- Nueva sección sobre nanotecnología y cerámicas (11.11)
- Nueva sección sobre huesos: un material compuesto natural (12.11)
- Nueva sección sobre daño por hidrógeno (13.5.11)
- Nueva sección sobre nanoelectrónica (14.9)
- Nuevos apéndices que destacan amplias referencias de propiedades de materiales

Otras nuevas características:

- Se han agregado objetivos de aprendizaje a cada capítulo
- Se han añadido íconos para destacar los recursos de medios suplementarios
- Se incluyeron muchas nuevas fotos de inicio de capítulo e interiores

Características mantenidas:

- Se ofrecen más de 1 200 problemas de fin de capítulo y más de 180 problemas de selección de materiales y diseño
- Mas de 140 problemas de ejemplo
- Aplicaciones modernas de materiales
- A través de todo el libro se utiliza un estilo legible y conciso; a los lectores se les proporcionan explicaciones comprensibles sin detalles excesivos

SUPLEMENTOS

Esta obra cuenta con interesantes suplementos que fortalecen los procesos de enseñanza-aprendizaje, así como la evaluación de éstos, mismos que se otorgan a profesores que adoptan este texto para sus cursos. Para obtener más información y conocer la política de entrega de estos materiales, contacte a su representante McGraw-Hill o envíe un correo electrónico a marketinghe@mcgraw-hill.com.

CD-ROM del estudiante

Hay un nuevo CD-ROM del estudiante que acompaña a la cuarta edición de *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* que muestra una gran cantidad de materiales de visualización y estudio.

- Se incluyen tres Laboratorios Virtuales, con videos, preguntas interactivas y procesos detallados de la vida real (con posibles trampas) para preparar mejor a los estudiantes en el laboratorio o servir como una simulación de una experiencia de laboratorio real para los estudiantes. Temas de laboratorio: medición de dureza utilizando la prueba de dureza Rockwell, metalografía, prueba de tensión.
- Un amplio manual de laboratorio en formatos PDF y Word
- MatVis es un software de visualización de cristales 2.0 que permite a los estudiantes crear diferentes estructuras y moléculas cristalinas, así como observar estructuras ya creadas.
- El software de diagramas de fase ICENine permite a los estudiantes investigar una lista de diagramas de fase y encontrar la composición a cualquier temperatura dada.
- El software computacional EES (Engineering Equation Solver) ofrece a los estudiantes la capacidad de resolver problemas de la ciencia de materiales.
- Las animaciones abarcan enlaces, fuerzas de enlace, cristales rotatorios, arreglos de empaques atómicos, planos cristalinos diferentes y miembros de coordinación, entre otros temas. Del mismo modo, se incluyen tutoriales con sonido.
- Amplias e investigables bases de datos de propiedades de materiales.
- Capítulos de bonificación sobre "materiales para SMEM y microsistemas," un capítulo de *MEMS and Microsystems: Design and Manufacture* de Tai-Ran Hsu.
- Numerosos enlaces web a sitios profesionales y materiales de referencia.

Centro de aprendizaje en línea El apoyo Web se proporciona para el libro en el sitio Web www.mhhe.com/catalogs/rep/. Visite este sitio para información sobre el libro y sus suplementos, erratas, información del autor y recursos para estudios posteriores o referencia.

RECONOCIMIENTOS

El coautor, Javad Hashemi, desearía agradecer el eterno amor, apoyo, estímulo y guía de su madre, Sedigheh, a través del curso de su vida y carrera. Dedica este libro a ella, así como a Eva, el amor de su vida, el más precioso regalo que le ha dado la vida, a Evan y Jonathon, sus hermanos y por último, pero no menos importante, a la memoria de su padre.

Los autores desean dar las gracias a los numerosos y valiosos comentarios, sugerencias, críticas constructivas y elogios de los siguientes evaluadores y revisores:

Raul Bargiola, *University of Virginia*
Deepak Bhat, *University of Arkansas*
Nigel Browning, *University of California, Davis*
David Cann, *Iowa State University*
Nikhilesh Chawla, *Arizona State University*
Deborah D.L. Chung, *University at Buffalo, The State University of New York*
James H. Edgar, *Kansas State University*
Jeffrey W. Fergus, *Auburn University*
Raymond A. Fournelle, *Marquette University*
Randall M. German, *Penn State University*
Stacy Gleixner, *San Jose State University*
Brian P. Grady, *University of Oklahoma*
Richard B. Griffin, *Texas A&M University*
Masanori Hara, *Rutgers University*
Lee Hornberger, *Santa Clara University*
Osman T. Inal, *New Mexico Tech*
Stephen Kampe, *Virginia Tech*
Ibrahim Karaman, *Texas A&M University*
Steve Krause, *Arizona State University*
David Kunz, *University of Wisconsin, Platteville*
Gladius Lewis, *University of Memphis*
Robert W. Messler, Jr., *Renesselaer Polytechnic Institute*
John Mirth, *University of Wisconsin, Platteville*
Devesh Misra, *University of Louisiana at Lafayette*
Kay Mortensen, *Brigham Young University*
David Niebuhr, *California Polytechnic State University*
Kanji Ono, *University of California, Los Angeles*
Martin Pugh, *Concordia University, Canada*
Susil Putatunda, *Wayne State University*
Lew Rabenberg, *University of Texas at Austin*
Wayne Reitz, *North Dakota State University*
James Michael Rigsbee, *North Carolina State University*

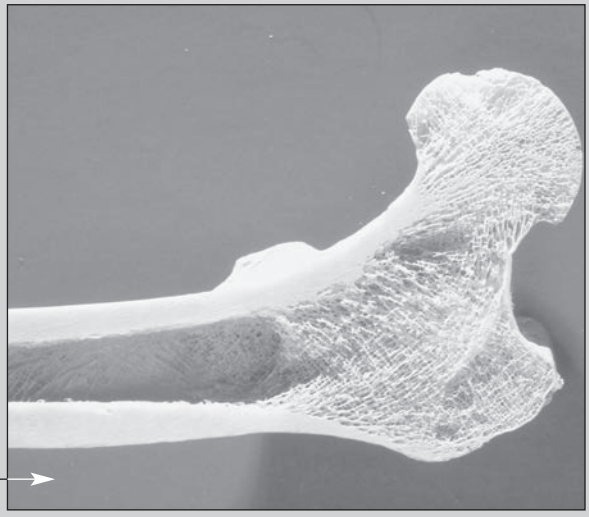
Jay M. Samuel, *University of Wisconsin*
John Schlup, *Kansas State University*
Yu-Lin Shen, *University of New Mexico*
Scott Short, *Northern Illinois University*
Susan B. Sinnott, *University of Florida*
Thomas Staley, *Virginia Tech*
Christopher Steinbruchel, *Renesselaer Polytechnic Institute*
Alexey Sverdlin, *Bradley University*
David S. Wilkinson, *McMaster University, Canada*
Chris Wise, *New Mexico State University*
Henry Daniel Young, *Wright State University*
Jiaxon Zhao, *Indiana University—Purdue University Fort Wayne*
Naveen Chandrashekar—*Texas Tech University*

Javad Hashemi

VISITA GUIADA

Se han añadido temas de la moderna ciencia de materiales a lo largo del texto que incluyen:

- Materiales/dispositivos inteligentes, SMEM y nanomateriales
- Aplicaciones biomédicas
- El capítulo 4 se ha dividido en dos capítulos para permitir que la difusión se cubra de manera individual
- Tres nuevas secciones dedicadas a aleaciones avanzadas y sus aplicaciones en ingeniería biomédica
- La cobertura de cerámicas se ha expandido para incluir nanotecnología y cerámicas



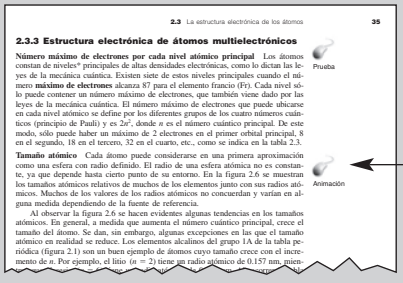
La selección de materiales y los problemas de diseño siguen a los problemas del fin de capítulo. Estos problemas retan a los estudiantes para crear soluciones de ingeniería mediante la selección de materiales y el diseño de procesos.

aproximadamente 750°C para que este compuesto sea altamente superconductor?

15.51 ¿Cuáles son algunas ventajas y desventajas de los nuevos superconductores de óxido de alta temperatura?

15.11 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. Diseñe un semiconductor que produciría fotones con longitudes de onda correspondientes a las de la luz verde.
2. El ZnS tiene una E_g de 2.76 eV. *a*) ¿Cuál sería el color de la radiación correspondiente a su fotón? *b*) ¿Cómo modificaría usted el semiconductor para producir un color de radiación diferente?
3. Seleccione un plástico óptico que tenga un ángulo crítico de 45 grados para que la luz se refleje totalmente cuando salga de la placa plana y entre en el aire (use la tabla 15.1).
4. *a*) Elija un material de la tabla 15.1 que tenga una reflectividad de luz incidente ordinaria de alrededor de 5 por ciento. *b*) Elija un material con el nivel más alto de reflectividad. *c*) Seleccione un material con el nivel más bajo de reflectividad. (Suponga que todas las superficies son lisas.)
5. Diseñe el espesor de un vidrio de silicato pulido que produciría *a*) no más de 2 por ciento de pérdidas de luz debido a la absorción y *b*) no más de 4 por ciento de pérdidas de luz por la absorción.
6. Explique cómo el tiempo de relajación de un fósforo de un televisor a color puede afectar la calidad de la imagen.
7. Elija un material para la transmisión óptica a lo largo de una longitud de 30 km sea tal que al menos permanezca 15 por ciento de la intensidad luminosa de la fuente.



2.3 La estructura electrónica de los átomos 35

2.3.3 Estructura electrónica de átomos multielectrónicos

Número máximo de electrones por cada nivel atómico principal Los átomos constan de niveles* principales de altas densidades electrónicas, como lo dictan las leyes de la mecánica cuántica. Existen siete de estos niveles principales cuando el número **máximo de electrones** alcanza 87 para el elemento francio (Fr). Cada nivel sólo puede contener un número máximo de electrones, que también viene dado por las leyes de la mecánica cuántica. El número máximo de electrones que puede ubicarse en cada nivel atómico se define por los diferentes grupos de los cuatro números cuánticos (principio de Pauli) y es $2n^2$, donde *n* es el número cuántico principal. De este modo, sólo puede haber un máximo de 2 electrones en el primer orbital principal, 8 en el segundo, 18 en el tercero, 32 en el cuarto, etc., como se indica en la tabla 2.3.

Prueba

Tamaño atómico Cada átomo puede considerarse en una primera aproximación como una esfera con radio definido. El radio de una esfera atómica no es constante, ya que depende hasta cierto punto de su entorno. En la figura 2.6 se muestran los tamaños atómicos relativos de muchos de los elementos junto con sus radios atómicos. Muchos de los valores de los radios atómicos no concuerdan y varían en alguna medida dependiendo de la fuente de referencia.

Animación

Al observar la figura 2.6 se hacen evidentes algunas tendencias en los tamaños atómicos. En general, a medida que aumenta el número cuántico principal, crece el tamaño del átomo. Se dan, sin embargo, algunas excepciones en las que el tamaño atómico en realidad se reduce. Los elementos alcalinos del grupo 1A de la tabla periódica (figura 2.1) son un buen ejemplo de átomos cuyo tamaño crece con el incremento de *n*. Por ejemplo, el litio ($n = 2$) tiene un radio atómico de 0.157 nm, mien-

Se han agregado íconos para destacar los recursos suplementarios de medios.

Se han añadido objetivos de aprendizaje a cada capítulo para guiar la comprensión del material por parte de los estudiantes.

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

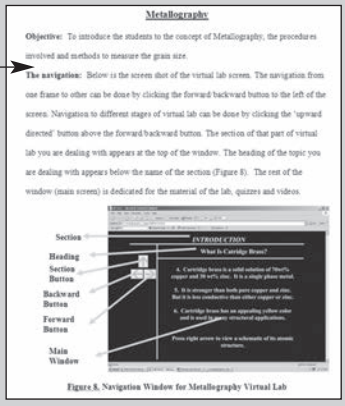
1. Explicar qué fenómenos pueden ocurrir con la radiación luminosa cuando ésta pasa de un medio a otro.
2. Discutir por qué los materiales metálicos son opacos a la luz visible.
6. Describir brevemente la construcción de un láser de rubí.
7. Describir el mecanismo de la absorción de fotones en un semiconductor que contiene defectos activos eléctricamente.
8. Explicar qué significa láser.
9. Describir de manera breve las ventajas de los

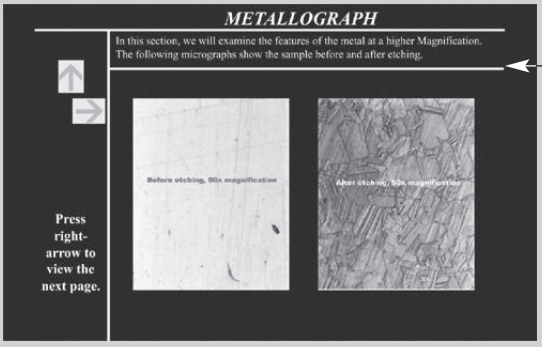
SUPLEMENTOS DE APRENDIZAJE PARA EL ESTUDIANTE

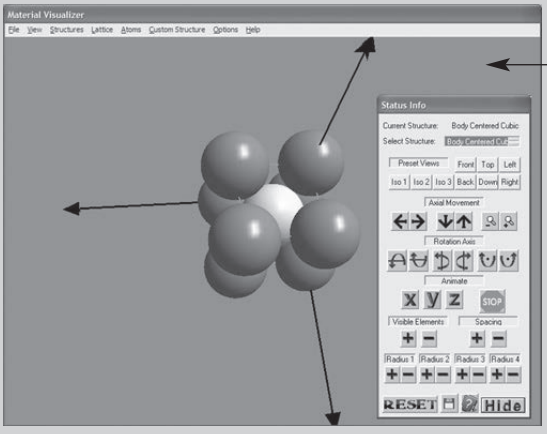
Un nuevo CD-ROM del estudiante acompaña a la cuarta edición de *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. Este CD-ROM incluye una gran cantidad de materiales de visualización y estudio.

LABORATORIOS VIRTUALES

Se incluyen tres Laboratorios Virtuales, con videos, preguntas interactivas y procesos detallados de la vida real (con posibles trampas) para preparar mejor a los estudiantes en el laboratorio o servir como una simulación de una experiencia de laboratorio real para los estudiantes. Temas de laboratorio: medición de dureza utilizando la prueba de dureza Rockwell, metalografía, prueba de tensión. Un amplio manual de laboratorio en formatos PDF y Word acompaña a los Laboratorios Virtuales.







SOFTWARE DE VISUALIZACIÓN

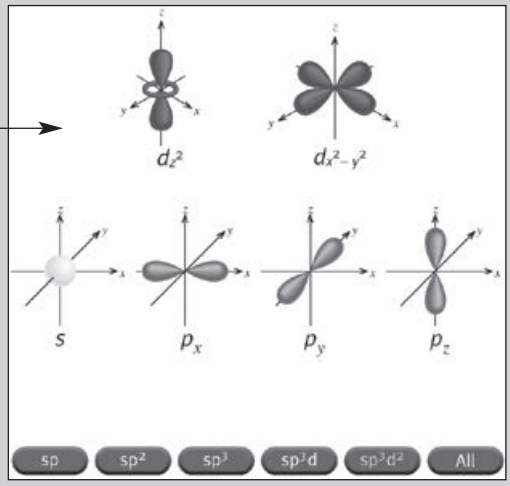
MatVis 2.0 es un software de visualización de cristales que permite a los estudiantes crear diferentes estructuras y moléculas cristalinas, así como observar estructuras ya creadas.

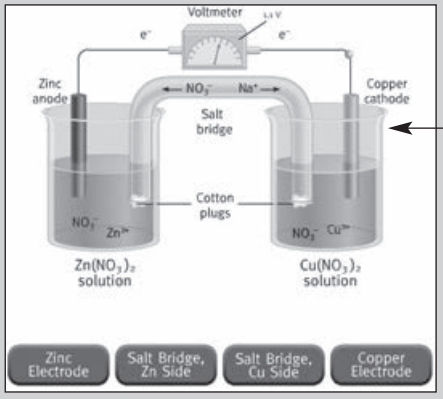
El software de diagramas de fase ICENine permite a los estudiantes investigar una lista de diagramas de fase y encontrar la composición a cualquier temperatura dada.

SUPLEMENTOS DE APRENDIZAJE PARA EL ESTUDIANTE

ANIMACIONES

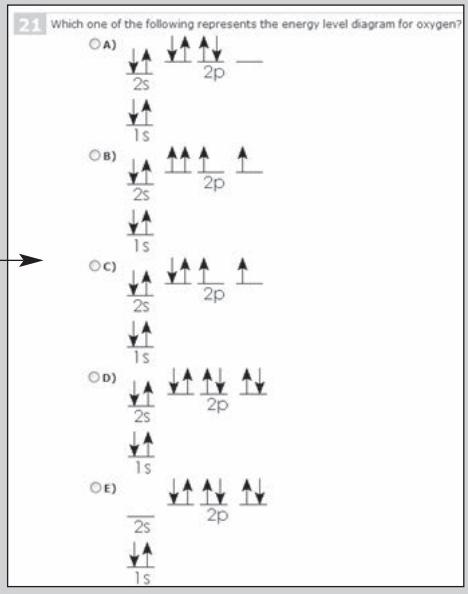
Las animaciones abarcan enlaces, fuerzas de enlace, cristales rotatorios, arreglos de empaques atómicos, planos cristalinos diferentes y miembros de coordinación, entre otros temas. De igual modo, se proporcionan tutoriales con sonido.





PREGUNTAS

Preguntas de opción múltiple acerca de números/masas atómicas, estructura electrónica, celdas/corrosión galvánica, enlace iónico y experimento de Rutherford junto con preguntas de repaso del examen FE.



CAPÍTULO 1

Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales

NASA (Fuente: *www.nasa.gov*)

Opportunity y *Spirit*, dos "robots geólogos" diseñados y construidos por la NASA, han proporcionado pruebas irrefutables de que algunas regiones de Marte alguna vez estuvieron cubiertas con agua. Los vehículos todo terreno son obras maestras de la ingeniería, en cuya concepción y construcción participaron científicos, diseñadores e ingenieros expertos en distintos campos. Uno de esos campos es el de la ciencia de los materiales. Considérense los aspectos de ingeniería y la selección de materiales en la construcción de los vehículos todo terreno, llevarlos a Marte empleando para ello vehículos de lanzamiento, lograr que los vehículos se posen sin contratiempos en la superficie del planeta rojo, dirigir el movimiento y las actividades de los vehículos, realizar experimentos científicos, recopilar y almacenar datos y, finalmente, comunicar los datos recopilados a la Tierra. Todas las clases principales de materiales, incluso metales, polímeros, cerámicos, compuestos y electrónicos, se emplean en la estructura de los vehículos todo terreno. Las misiones a Marte amplían las fronteras del conocimiento y la capacidad de creación en el campo de la ciencia y de la ingeniería de los materiales. Mediante el estudio de la ciencia e ingeniería de los materiales, es posible percatarse de los desafíos y complejidades que implican esas misiones. ■

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Describir el objeto de la ciencia e ingeniería de los materiales como disciplina científica.
2. Mencionar la clasificación primaria de los materiales sólidos.
3. Enunciar las características distintivas de cada grupo de materiales.
4. Mencionar un material perteneciente a cada grupo. Enunciar algunas aplicaciones de distintos tipos de materiales.
5. Evaluar sus conocimientos acerca de los materiales.
6. Establecer la importancia de la ciencia e ingeniería de los materiales en la selección de éstos para varias aplicaciones.

1.1 LOS MATERIALES Y LA INGENIERÍA

El hombre, los materiales y la ingeniería han evolucionado en el transcurso del tiempo y continúan haciéndolo. El mundo actual es de cambios dinámicos y los materiales no son la excepción. A través de la historia, el progreso ha dependido de las mejoras de los materiales con los que se trabaja. El trabajo del hombre prehistórico estaba limitado a los materiales disponibles en la naturaleza como la piedra, madera, huesos y pieles. Con el transcurso del tiempo, pasaron de la Edad de Piedra a las nuevas edades de cobre (bronce) y de hierro. Debe mencionarse que este adelanto no sucedió de manera uniforme ni simultánea en todas partes (se verá que esto ocurre en la naturaleza, incluso a escala microscópica). Aun hoy día existe esa limitación respecto a los materiales que se obtienen de la corteza terrestre y la atmósfera (tabla 1.1). De acuerdo con el diccionario Webster, los materiales son sustancias con las que algo está compuesto o hecho. Aunque esta definición es amplia, desde una perspectiva de aplicación de la ingeniería, cubre casi todas las situaciones que interesan en este texto.

La producción y elaboración de los materiales hasta convertirlos en productos terminados constituyen una parte importante de la economía actual. Los ingenieros diseñan la mayoría de los productos manufacturados y los sistemas de elaboración necesarios para su producción. Dado que los materiales son necesarios para fabricar productos, los ingenieros deben conocer la estructura interna y las propiedades de los materiales, de tal manera que puedan elegir los más adecuados para cada aplicación y crear los mejores métodos para procesarlos.

Los ingenieros expertos en investigación y desarrollo crean nuevos materiales o modifican las propiedades de los existentes. Los ingenieros de diseño usan materiales actuales, modificados o nuevos para diseñar y crear nuevos productos y sistemas. En ocasiones los ingenieros requieren de un nuevo material para su diseño, y la tarea de crearlo será encomendada a científicos e ingenieros especialistas en investigación. Por ejemplo, los ingenieros que estén proyectando un *transporte público de alta velocidad* (HSCT, por sus siglas en inglés) (figura 1.1) deberán crear nuevos materiales que soporten temperaturas de hasta 1 800°C (3 250°F), de modo que puedan alcanzarse velocidades del aire en el intervalo de 12 a 25 Mach.[1] Hay in-

[1] Mach 1 equivale a la velocidad del sonido en el aire.

Tabla 1.1 Elementos más comunes en la corteza terrestre y atmósfera por porcentaje de peso y volumen

Elemento	Porcentaje, en peso, en la corteza terrestre
Oxígeno (O)	46.60
Silicio (Si)	27.72
Aluminio (Al)	8.13
Hierro (Fe)	5.00
Calcio (Ca)	3.63
Sodio (Na)	2.83
Potasio (K)	2.70
Magnesio (Mg)	2.09
Total	98.70
Gas	**Porcentaje de aire seco, en volumen**
Nitrógeno (N_2)	78.08
Oxígeno (O_2)	20.95
Argón (Ar)	0.93
Bióxido de carbono (CO_2)	0.03

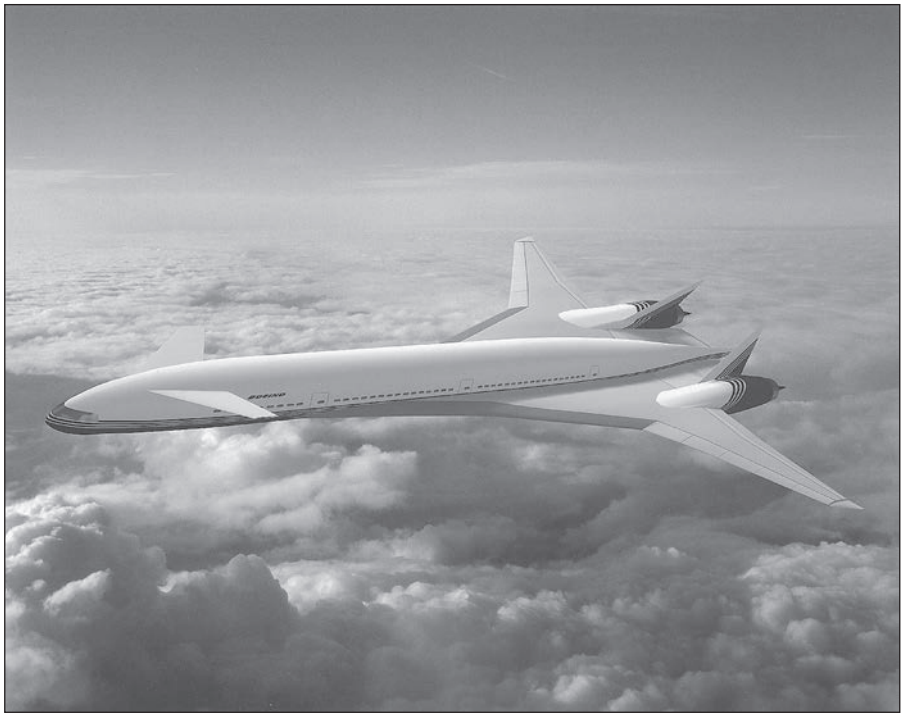


Figura 1.1
Imagen de un avión de transporte civil a alta velocidad con motores que funcionan a Mach 7. Los anillos indican las velocidades de flujo superficiales. *(© The Boeing Company.)*

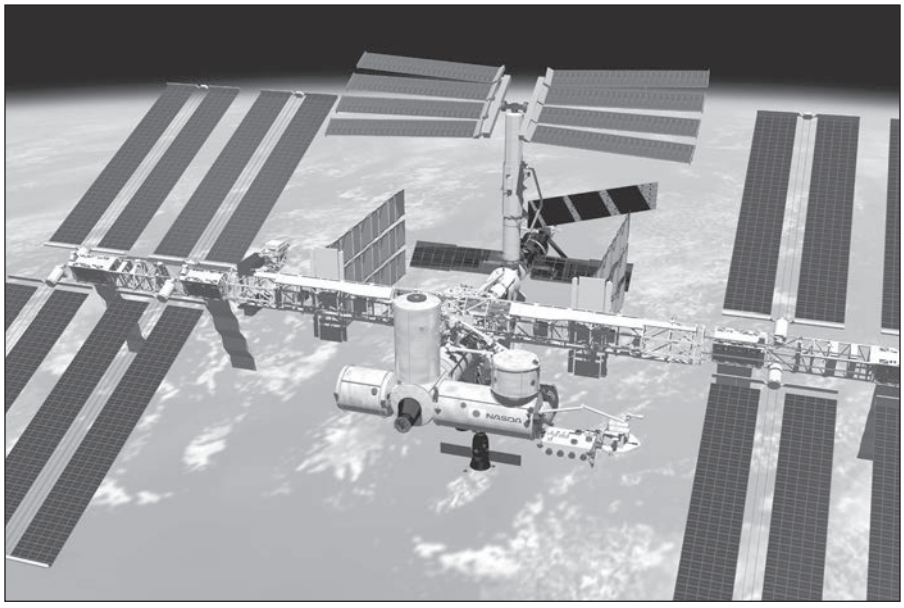


Figura 1.2
La estación espacial internacional.
(© AFP/CORBIS)

vestigaciones en curso para crear nuevos materiales compuestos de matriz cerámica, compuestos intermetálicos refractarios y superaleaciones monocristalinas para ésta y otras aplicaciones similares.

Un área que exige un trabajo máximo de científicos e ingenieros expertos en materiales es el de la exploración espacial. El diseño y la construcción de la *Estación Espacial Internacional* (ISS, por sus siglas en inglés) y las misiones *Vehículos todo terreno para la exploración de Marte* (MER, por sus siglas en inglés) son ejemplos de actividades de investigación y exploración espacial que exigen un trabajo óptimo de los científicos e ingenieros especialistas en materiales. En la construcción de la ISS, un gran laboratorio de investigación que se desplaza por el espacio a una velocidad de 27 000 km/h, se utilizó una selección de materiales que funcionan en un ambiente muy diferente al de la Tierra (figura 1.2). Los materiales debían ser livianos para minimizar el peso de la carga útil durante el despegue. La cubierta exterior del laboratorio debía protegerlo del impacto de meteoros diminutos y de la chatarra espacial creada por el hombre. La presión interna del aire en la estación, de unas 15 psi, somete los módulos a un esfuerzo constante. Además, los módulos deben soportar las enormes fuerzas generadas durante el lanzamiento. La selección de materiales para construir las MER representa también un desafío, sobre todo si se considera que deben permanecer en un ambiente en el que las temperaturas nocturnas pueden llegar a los –96°C. Éstas y otras condiciones hacen necesario ampliar la selección de materiales cuando se diseña un sistema complejo.

Se debe tener siempre presente que el empleo de materiales y los proyectos de ingeniería están en constante cambio y que este cambio es acelerado. Nadie puede predecir los adelantos del futuro lejano en la creación de los materiales y su empleo. En

1943 se predijo que las personas afortunadas tendrían en Estados Unidos sus propios autogiros (autoaeroplanos). ¡Qué errada fue esa predicción! Al mismo tiempo, se soslayaron las posibilidades futuras del transistor, el circuito integrado y la televisión (la de color y la de alta definición inclusive). Hace 30 años, muchas personas no habrían creído que algún día las computadoras serían aparatos comunes en el hogar, similares a un teléfono o a un refrigerador. Asimismo, hoy día aún cuesta creer que en alguna fecha dada los viajes espaciales habrán de comercializarse e incluso se podría colonizar Marte. No obstante, la ciencia y la ingeniería pueden hacer reales los sueños más inalcanzables.

La búsqueda de nuevos materiales es permanente. Por ejemplo, los ingenieros mecánicos requieren de materiales que resistan altas temperaturas de modo que los motores a reacción puedan funcionar con mayor eficacia. Los ingenieros eléctricos requieren de nuevos materiales que permitan que los dispositivos electrónicos funcionen a mayores velocidades y a mayores temperaturas. Los ingenieros aeronáuticos requieren de materiales con mayor relación resistencia-peso para vehículos aeroespaciales. Los ingenieros químicos y los expertos en materiales procuran descubrir materiales más resistentes a la corrosión. Distintas industrias buscan materiales y dispositivos inteligentes y sistemas microelectromecánicos para usarlos como detectores y accionadores en sus respectivas aplicaciones. Recientemente, el campo de los nanomateriales ha captado mucho la atención de científicos e ingenieros de todo el mundo. Las novedosas propiedades estructurales, químicas y mecánicas de los nanomateriales han abierto nuevas y emocionantes posibilidades en la aplicación de estos materiales a diferentes campos de la ingeniería y la medicina. Éstos son tan sólo unos ejemplos de la búsqueda de los ingenieros y los científicos de nuevos y mejores materiales y procesos para innumerables aplicaciones. ¡En muchos casos lo que ayer era imposible hoy es realidad!

Los ingenieros de todas las disciplinas deben tener nociones básicas sobre los materiales de ingeniería para poder realizar sus labores con mayor eficiencia. El objeto de este libro es hacer una introducción a la estructura interna, propiedades, elaboración y aplicaciones de dichos materiales. Dada la enorme cantidad de información disponible sobre los materiales de ingeniería y las limitaciones de este libro, la presentación ha debido ser selectiva.

1.2 CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

El objetivo principal de la **ciencia de los materiales** es el conocimiento básico de la estructura interna, las propiedades y la elaboración de materiales. La **ingeniería de los materiales** se interesa principalmente por el empleo del conocimiento fundamental y aplicado acerca de los materiales, de modo que éstos puedan ser convertidos en los productos que la sociedad necesita o desea. El término *ciencia e ingeniería de los materiales* combina la ciencia de los materiales y la ingeniería de los materiales y es el tema de este libro. En el espectro del conocimiento acerca de los materiales, la ciencia de los materiales se encuentra en uno de los extremos representando el conocimiento básico, y la ingeniería de los materiales se halla en el otro extremo representando el conocimiento aplicado, y no hay una línea divisoria entre las dos (figura 1.3).

En la figura 1.4 se muestra un diagrama con tres anillos que indica la relación entre las ciencias básicas (y las matemáticas), la ciencia de los materiales y la ingenie-

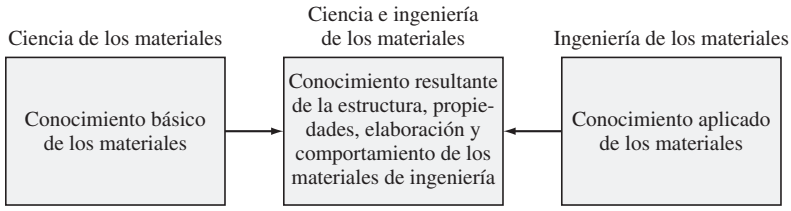


Figura 1.3
Espectro sobre el conocimiento de los materiales. Emplear el conocimiento combinado de los materiales tanto de la ciencia de los materiales como de la ingeniería de los materiales permite a los ingenieros convertir los materiales en los productos que la sociedad necesita.

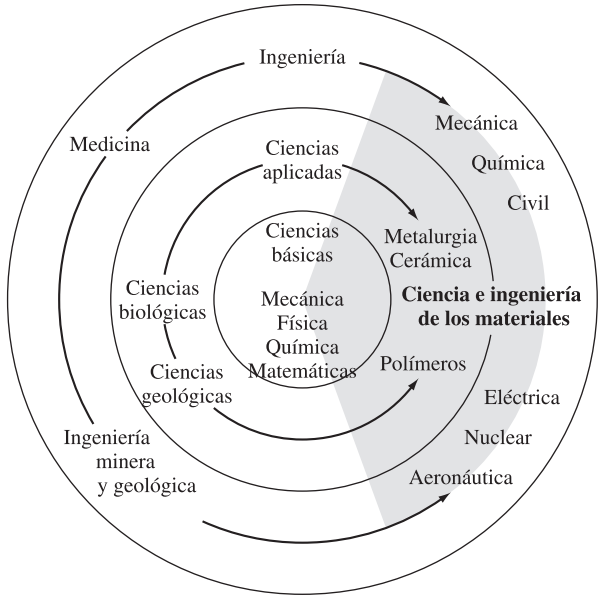


Figura 1.4
Este diagrama muestra cómo la ciencia e ingeniería de los materiales tiende un puente de conocimiento entre las ciencias básicas y las disciplinas de la ingeniería.
(Cortesía de la Academia Nacional de Ciencias.)

ría (y otras de sus disciplinas). Las ciencias básicas se ubican en el anillo interior o centro del diagrama, y las distintas disciplinas de la ingeniería (mecánica, eléctrica, civil, química, etc.) se ubican en anillo exterior. Las ciencias aplicadas, la metalurgia, la cerámica y la ciencia de los polímeros se ubican en el anillo de en medio. Este diagrama muestra que la ciencia e ingeniería de los materiales forman un puente entre el conocimiento de las ciencias básicas (y las matemáticas) y las disciplinas de la ingeniería acerca de los materiales.

1.3 TIPOS DE MATERIALES

Por comodidad, la mayoría de los materiales utilizados en ingeniería se dividen en *tres* grupos principales: **materiales metálicos, poliméricos** y **cerámicos**. En este capítulo se distinguirá entre ellos con base en algunas de sus propiedades mecánicas, eléctricas y físicas más importantes. En capítulos posteriores se estudiarán las diferencias en cuanto a estructura interna entre estos tipos de materiales. Además de estos tres grupos de materiales, se tomarán en cuenta dos tipos más, los **materiales compuestos** y los **materiales electrónicos**, dada su gran importancia en la ingeniería.

1.3.1 Materiales metálicos

Estos materiales son sustancias inorgánicas compuestas por uno o más elementos metálicos y pueden contener algunos elementos no metálicos. Son ejemplos de elementos metálicos el hierro, el cobre, el aluminio, el níquel y el titanio. Los materiales metálicos pueden contener elementos no metálicos como carbono, nitrógeno y oxígeno. Los metales tienen una estructura cristalina en la que los átomos están dispuestos de manera ordenada. En general, los metales son buenos conductores térmicos y eléctricos. Muchos metales son relativamente resistentes y dúctiles a la temperatura ambiente y presentan alta resistencia, incluso a altas temperaturas.

Los metales y las aleaciones[2] suelen dividirse en dos clases: **aleaciones y metales ferrosos** que contienen un alto porcentaje de hierro, como el acero y el hierro fundido, y **aleaciones y metales no ferrosos** que carecen de hierro o contienen sólo cantidades relativamente pequeñas de éste. Son ejemplos de metales no ferrosos el aluminio, el cobre, el zinc, el titanio y el níquel. La distinción entre aleaciones ferrosas y no ferrosas se hace debido al empleo y producción considerablemente mayores de aceros y hierros fundidos en comparación con otras aleaciones.

Ya sea en aleación o puros, los metales se emplean en numerosas industrias; entre otras, la aeronáutica, la biomédica, de los semiconductores, electrónica, energética, de estructuras civiles y del transporte. Se espera que en Estados Unidos la producción de metales básicos como aluminio, cobre, zinc y magnesio siga muy de cerca a la economía estadounidense. Sin embargo, la producción de hierro y acero ha sido menor a la esperada debido a la competencia internacional y a las siempre importantes razones económicas. Los científicos e ingenieros especializados en materiales buscan constantemente mejorar las propiedades de las aleaciones actuales y diseñar y producir nuevas aleaciones con mejores propiedades de fuerza, resistencia a altas temperaturas, deformación (véase la sección 7.4) y fatiga (véase la sección 7.2). Las aleaciones actuales pueden perfeccionarse con mejores técnicas químicas, controlando la composición y las técnicas de procesado. Por ejemplo, hacia 1961, estaban disponibles nuevas y mejores **superaleaciones** basadas en níquel y en hierro-níquel y cobalto, para emplearse en álabes de turbinas de alta presión en turbinas de gas para aeronaves. Se empleó el término superaleación debido a su mejor rendimiento a temperaturas elevadas de aproximadamente 540°C (1 000°F) y a sus altos niveles de esfuerzo. Las figuras 1.5 y 1.6 muestran un motor con turbina de gas PW-400 fabricado principalmente con aleaciones y superaleaciones metálicas. Los metales usados dentro del motor deben ser capaces de resistir las altas temperaturas y presio-

[2] Una aleación metálica es la combinación de dos o más metales o de un metal (metales) y un no metal (no metales).

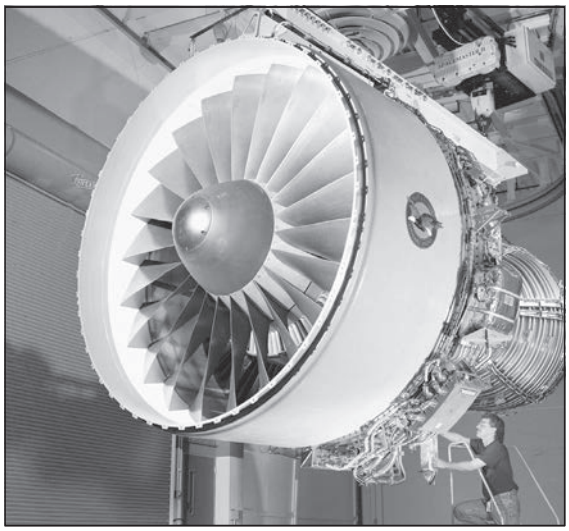


Figura 1.5
El motor de turbina para avión (PW 4000) que se muestra está fabricado principalmente con aleaciones metálicas. En este motor se emplean las más recientes aleaciones de alta temperatura basadas en níquel, resistentes al calor y que tienen una gran resistencia. Este motor incorpora muchas tecnologías avanzadas, de excelente servicio que redundan en un mejor funcionamiento y durabilidad. Destacan entre estas tecnologías la de los materiales monocristalinos de segunda generación empleados en los álabes de la turbina, y la pulvimetalurgia con la que se fabricaron los discos, así como un mejor control electrónico digital de motor, de monitoreo total.
(Por cortesía de Pratt & Whitney Co.)

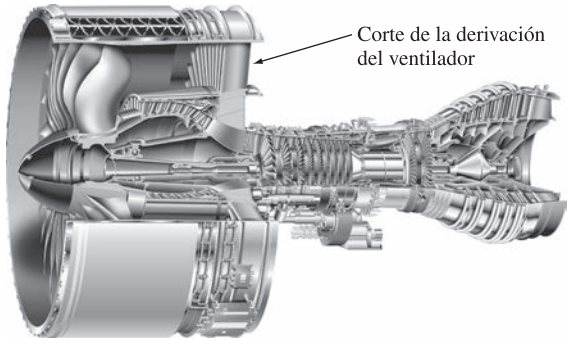


Figura 1.6
Vista en corte del motor de turbina de gas PW 4000, de 284.48 cm (112 pulgadas) que muestra la sección del conducto del ventilador.
(Por cortesía de Pratt & Whitney Co.)

nes generadas durante su funcionamiento. Hacia 1980, se mejoraron las técnicas de fundición para producir un grano de columna solidificado direccionalmente (véase la sección 4.2) y aleaciones de fundición monocristalinas con base en níquel (véase la sección 4.2). Hacia la década de 1990, las aleaciones de fundición monocristalinas, solidificadas direccionalmente, eran la norma en muchas aplicaciones para fabricar turbinas de gas para avión. El mejor rendimiento de las superaleaciones a altas temperaturas de funcionamiento, mejoró considerablemente la eficacia de los motores de avión.

Muchas aleaciones metálicas como las de titanio, acero inoxidable y las basadas en cobalto se emplearon también en aplicaciones biomédicas, incluso en implantes ortopédicos, válvulas cardíacas, dispositivos de fijación y tornillos. Estos materiales ofrecen gran resistencia, dureza y biocompatibilidad. La biocompatibilidad es importante puesto que el ambiente dentro del cuerpo humano es en extremo corrosivo y, por lo tanto, la impenetrabilidad de los materiales empleados para tales aplicaciones es fundamental.

Además de mejorar la química y el control de la composición, los investigadores e ingenieros se afanan también en mejorar nuevas técnicas de elaboración de es-

tos materiales. Los métodos de elaboración como el prensado isoestático en caliente (véase sección 11.4) y el forjado isotérmico han llevado a la mejor resistencia a la fatiga de muchas aleaciones. Asimismo, seguirán siendo importantes las técnicas de pulvimetalurgia ya que pueden obtenerse mejores propiedades para algunas aleaciones con un menor costo del producto terminado.

1.3.2 Materiales poliméricos

La mayoría de los materiales poliméricos constan de largas cadenas o redes moleculares que frecuentemente se basan en compuestos orgánicos (precursores que contienen carbono). Desde un punto de vista estructural, la mayoría de los materiales poliméricos no son cristalinos, pero algunos constan de mezclas de regiones cristalinas y no cristalinas. La resistencia y ductibilidad de los materiales poliméricos varía considerablemente. Dada la naturaleza de su estructura interna, la mayoría de los materiales poliméricos son malos conductores de electricidad. Algunos de estos materiales son buenos aislantes y se emplean como aislantes eléctricos. Una de las aplicaciones más recientes de materiales poliméricos ha sido en la fabricación de *discos de video digitales* (DVD) (figura 1.7). En general, los materiales poliméricos tienen bajas densidades y temperaturas de ablandamiento o de descomposición relativamente bajas.

En el transcurso de la historia, los plásticos han sido el material básico de crecimiento más acelerado en Estados Unidos, con un ritmo anual de crecimiento de 9% con base en su peso (véase la figura 1.14). Sin embargo, el ritmo de crecimiento de los plásticos durante 1995 bajó a menos de 5%, una disminución considerable. Esta reducción se esperaba, puesto que los plásticos ya sustituyeron a los metales, al vidrio y al papel en la mayoría de los principales mercados que manejan grandes volúmenes, como los del embalaje y la construcción, para los cuales los plásticos son apropiados.

De acuerdo con algunas predicciones, se espera que los plásticos industriales, como el nailon, sigan compitiendo con los metales. La figura 1.8 muestra los costos esperados de las resinas plásticas industriales en comparación con algunos metales comunes. Las industrias proveedoras de polímeros se centran cada vez más en

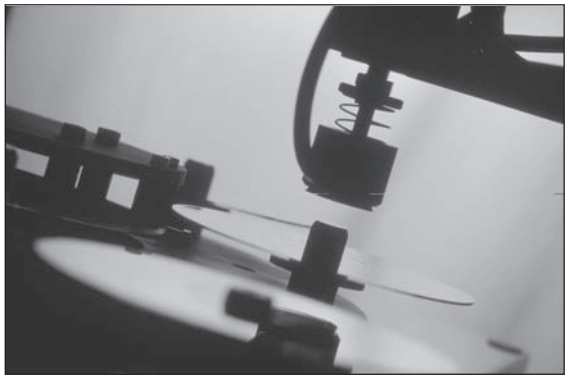


Figura 1.7
Los productores de resina plástica están elaborando polímeros de policarbonato ultrapuros y con grados de alta fluidez para la fabricación de DVD. *(© George B. Diebold/CORBIS.)*

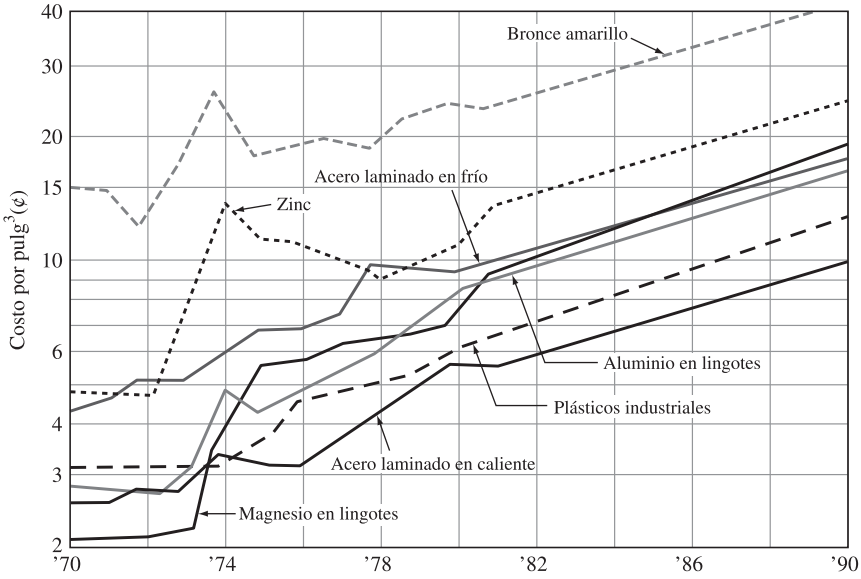


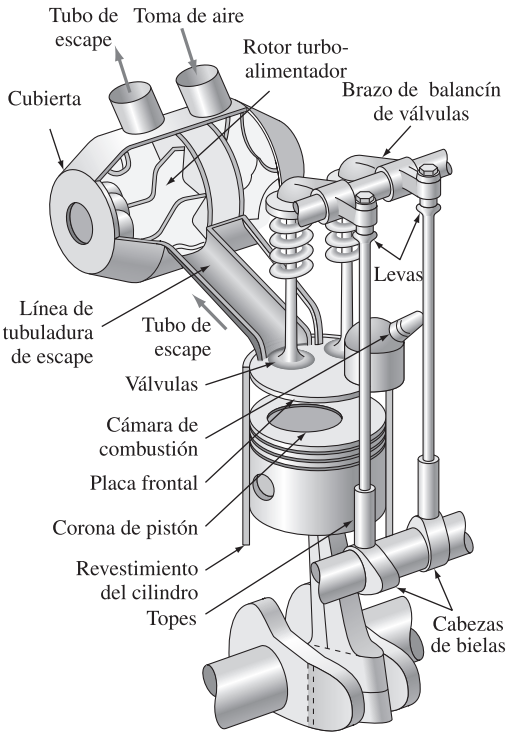
Figura 1.8
Costos históricos y esperados de las resinas plásticas para ingeniería *versus* los costos de algunos metales comunes, desde 1970 hasta 1990. Se espera que los plásticos para ingeniería sigan compitiendo con el acero laminado en frío y otros metales.
(Según Modern Plastics, agosto de 1982, p. 12, y datos nuevos, 1998.)

la creación de mezclas de polímeros con otros polímeros, conocidas también como *aleaciones* o **mezclas**, para ajustarlas a aplicaciones específicas para las cuales ningún otro polímero es adecuado por sí solo. Debido a que las mezclas se producen con base en los polímeros existentes con propiedades bien conocidas, su creación resulta menos costosa y más confiable que sintetizar un polímero único para una aplicación específica. Por ejemplo, los elastómeros (un tipo de polímero muy deformable) suelen mezclarse con otros plásticos para mejorar la resistencia del material al impacto. Esas mezclas tienen un empleo importante en parachoques automotores, alojamientos de las herramientas motorizadas, artículos deportivos y componentes sintéticos de muchas instalaciones de pistas de atletismo techadas, que suelen estar fabricadas con una combinación de caucho y poliuretano. Los revestimientos acrílicos mezclados con varias fibras y materiales de refuerzo y colores brillantes se emplean como material de revestimiento para pistas de tenis y patios de juegos. Sin embargo, otros materiales de revestimiento fabricados con polímeros se están empleando para proteger de la corrosión, ambientes químicos amenazantes, choque térmico, impacto, desgaste y abrasión. La búsqueda de nuevos plásticos y aleaciones continúa dado su menor costo y buenas propiedades para muchas aplicaciones.

1.3.3 Materiales cerámicos

Los materiales cerámicos son materiales inorgánicos formados por elementos metálicos y no metálicos enlazados químicamente entre sí. Los materiales cerámicos pueden ser cristalinos, no cristalinos o mezclas de ambos. La mayoría de los materiales cerámicos tienen una gran dureza y resistencia a las altas temperaturas pero tienden

a)



b)

Figura 1.9
a) Ejemplos de materiales cerámicos de nueva generación, inventados recientemente para ser aplicados en motores de tecnología de punta. Las piezas negras son válvulas, asientos de válvula y pernos de pistón fabricados con nitruro de silicio. La pieza blanca es una abertura múltiple para el colector fabricada con un material cerámico a base de alúmina.
(Por cortesía de Kyocera Industrial Ceramics Corp.)
b) Posibles aplicaciones de elementos cerámicos en un motor turbodiesel.
(Según Metals and Materials, diciembre de 1988.)

a ser frágiles (con poca o nula deformación antes de la fractura). Destacan entre las ventajas de los materiales cerámicos para aplicaciones industriales su peso ligero, gran resistencia y dureza, buena resistencia al calor y al desgaste, poca fricción y propiedades aislantes (véanse las figuras 1.9 y 1.10). Las propiedades aislantes, junto con la alta resistencia al calor y al desgaste de muchos materiales cerámicos, los vuelve útiles en revestimientos de hornos para tratamientos térmicos y fusión de metales como el acero. La búsqueda de nuevos plásticos y aleaciones continúa dado su menor costo y buenas propiedades para muchas aplicaciones.

En Estados Unidos, la tasa de crecimiento histórica de los materiales cerámicos tradicionales como arcilla, vidrio y piedra ha sido de 3.6% (desde 1966 hasta 1980). La tasa de crecimiento esperada de estos materiales desde 1982 hasta 1995 siguió a la economía estadounidense. En las últimas décadas, se ha producido toda una nueva familia de materiales cerámicos de óxidos, nitruros y carburos que tienen mejores propiedades. La nueva generación de materiales cerámicos llamados *cerámicos de ingeniería*, *cerámicos estructurales* o **cerámicos avanzados** tienen mayor resis-

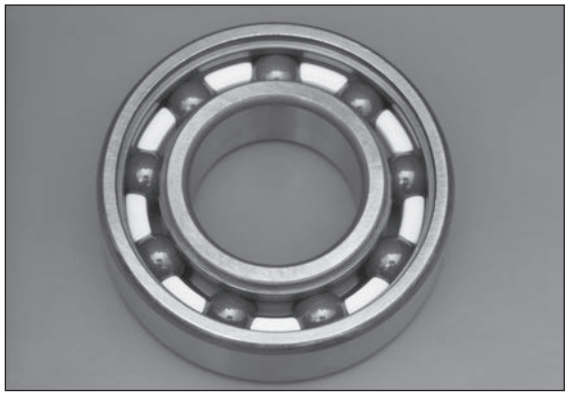


Figura 1.10
Cojinetes y canales-guía de titanio y nitruro de carbono fabricados por tecnología de pulvimetalurgia.
(© Tom Pantages. Foto por cortesía de Bearing Works.)

tencia, mejor resistencia al desgaste y a la corrosión (aun a temperaturas altas) y al choque térmico. Entre los materiales cerámicos avanzados establecidos están la alúmina (óxido), el nitruro de silicio (nitruro) y el carburo de silicio (carburo).

Una importante aplicación de los cerámicos avanzados en la aeronáutica son las losetas cerámicas del transbordador espacial. Las losetas cerámicas están fabricadas con carburo de silicio por la capacidad de este material para actuar como escudo térmico y volver rápidamente a temperaturas normales al retirarse la fuente de calor. Estos materiales cerámicos protegen térmicamente la estructura interna del transbordador durante el lanzamiento y su regreso a la atmósfera terrestre (véanse las figuras 11.50 y 11.51). Otra aplicación de los cerámicos avanzados que apunta a la versatilidad, importancia y crecimiento futuro de esta clase de materiales es su empleo como material para herramientas de corte. Por ejemplo, el nitruro de silicio, que tiene alta resistencia al choque térmico y resistencia a la fractura, es un excelente material para herramientas de corte.

Las aplicaciones de los materiales cerámicos son en verdad ilimitadas, dado que se hacen en las industrias aeronáutica, metalúrgica, biomédica, automotriz y muchas más. Las dos principales desventajas de este tipo de materiales son 1) la dificultad para elaborar con ellos productos terminados, y por tanto su alto costo, y 2) son frágiles y, comparados con los metales, tienen baja tenacidad. Si avanzan más las técnicas para fabricar materiales cerámicos de gran resistencia a la tenacidad, estos materiales podrían tener un enorme repunte en el campo de las aplicaciones de ingeniería.

1.3.4 Materiales compuestos

Un material compuesto puede definirse como dos o más materiales (fases o constituyentes) integrados para formar un material nuevo. Los constituyentes conservan sus propiedades y el nuevo compuesto tendrá propiedades distintas a la de cada uno de ellos. La mayoría de los materiales compuestos están formados por un material específico de relleno que a su vez sirve de refuerzo, y una resina aglomerante con objeto de lograr las características y propiedades deseadas. Los componentes no suelen

disolverse entre sí y pueden identificarse físicamente gracias a la interfaz que existe entre ellos. Los materiales compuestos pueden ser de muchos tipos. Los que predominan son los fibrosos (compuestos o fibras en una matriz) y los particulados (compuestos o partículas en una matriz). Existen muchas combinaciones diferentes de materiales de refuerzo y matrices que puede emplearse para producir materiales compuestos. Por ejemplo, el material de la matriz puede ser un metal, como el aluminio; una cerámica, como la alúmina; o un polímero, como la resina epóxica. Dependiendo del tipo de matriz empleado, el material compuesto puede clasificarse como *compuesto de matriz metálica* (MMC, por sus siglas en inglés), *compuesto de matriz cerámica* (CMC, por sus siglas en inglés), o *compuesto de matriz polimérica* (PMC, por sus siglas en inglés). También pueden seleccionarse los materiales fibrosos o particulados entre cualquiera de las tres clases principales de materiales con ejemplos como carbón, vidrio, aramida, carburo de silicio y otros. Las combinaciones de materiales empleados en el diseño de compuestos dependen principalmente del tipo de aplicación y ambiente en el que el material habrá de emplearse.

Los materiales compuestos han sustituido a numerosos componentes mecánicos, en particular en las industrias aeronáutica, electrónica de la aviación, automotriz, de estructuras civiles y de equipo deportivo. Se ha previsto un aumento anual medio de alrededor de 5% en el empleo futuro de estos materiales. Una de las razones de ello es su elevada relación de resistencia y rigidez-peso. Algunos materiales compuestos avanzados tienen una rigidez y resistencia similar a la de algunos metales, pero con una densidad considerablemente menor y, por lo tanto, menor peso general de los componentes. Estas características vuelven muy atractivos a los materiales compuestos avanzados cuando el peso de los componentes resulta crucial. Por regla general, de manera similar a los materiales cerámicos, las principales desventajas de la mayoría de los materiales compuestos son su fragilidad y baja tenacidad. Algunos de los inconvenientes pueden superarse, en determinadas situaciones, mediante la selección adecuada del material de la matriz.

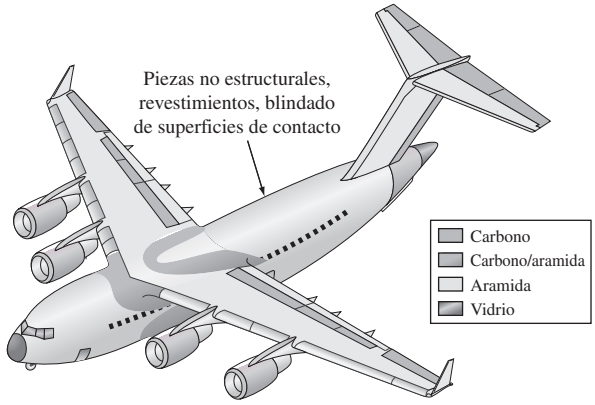


Figura 1.11
Visión de conjunto de una amplia variedad de piezas de materiales compuestos empleadas en el avión de transporte C-17 de la fuerza aérea. Este aparato tiene una envergadura de 165 pies y utiliza 15 000 libras de materiales compuestos avanzados.
(Según Advanced Composites, mayo-junio de 1988, p. 53.)

Dos tipos sobresalientes de *materiales compuestos modernos* empleados en aplicaciones industriales son el refuerzo de fibra de vidrio en una matriz de poliéster o de resina epóxica y fibras de carbono en una matriz de resina epóxica. La figura 1.11 muestra el empleo de un material compuesto por fibras de carbono y resina epóxica en las alas y los motores de un avión de transporte C-17. Desde la construcción de estos aviones, se han introducido nuevos procedimientos y modificaciones que han abaratado los costos (véase *Aviation Week & Space Technology* del 9 junio de 1997, p. 30).

1.3.5 Materiales electrónicos

Los materiales electrónicos no son importantes por su volumen de producción, pero sí lo son extremadamente por su avanzada tecnología. El material electrónico más importante es el silicio puro, al que se modifica de distintos modos para cambiar sus características eléctricas. Muchísimos circuitos electrónicos complejos se pueden miniaturizar en un chip de silicio de aproximadamente 3/4 de pulg^2 (1.90 cm^2) (figura 1.12). Los dispositivos microelectrónicos han hecho posibles nuevos productos, como los satélites de comunicaciones, las computadoras avanzadas, las calculadoras de bolsillo, los relojes digitales y los robots (figura 1.13).

El empleo del silicio y otros materiales semiconductores en la electrónica de estado sólido y en la microelectrónica, ha demostrado un enorme crecimiento desde 1970, y se espera que esta tendencia continúe. Han sido espectaculares los efectos de las computadoras y otros tipos de equipo industrial que emplean circuitos integrados fabricados con chips de silicio. Aún está por determinarse el efecto de los robots computarizados en los procesos de fabricación actuales. Sin duda, los materiales electrónicos tendrán un papel fundamental en las "fábricas del futuro", en las que casi toda la fabricación la realizarán robots asistidos por herramientas controladas por computadora.

Con el paso de los años, se han fabricado circuitos integrados con una densidad cada vez mayor de transistores dispuestos en un solo chip de silicio, con una correspondiente disminución del ancho del transistor. Por ejemplo, en 1998 la resolución punto a punto para la medida más pequeña de un chip de silicio era de 0.18 μm y el diámetro de la oblea de silicio empleada fue de 12 pulgadas (300 mm). Otra me-

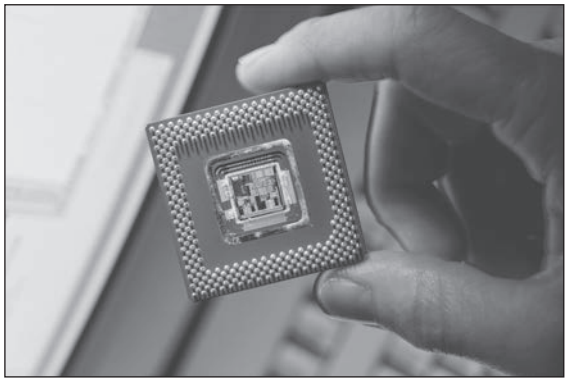


Figura 1.12
Los microprocesadores modernos tienen múltiples salidas, como se muestra en la fotografía del microprocesador Pentium II de Intel.
(© Don Mason/CORBIS.)

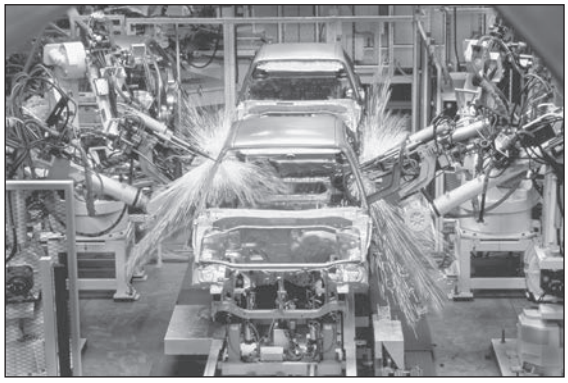


Figura 1.13
Robots computarizados para soldar un vehículo de General Motors modelo 1994 en Shreveport, LA.
(© Charles O'Rear/CORBIS.)

jora puede ser la sustitución de aluminio por cobre en las interconexiones dada la mayor conductividad de éste.

1.4 COMPETENCIA ENTRE LOS MATERIALES

Los materiales compiten entre sí en los mercados actuales y en los nuevos. A lo largo de un periodo surgen muchos factores que hacen posible la sustitución de un material por otro en determinadas aplicaciones. El costo es, por supuesto, un factor. Si se hace un descubrimiento importante en el procesado de determinado tipo de material, de modo que su costo se reduzca considerablemente, este material puede reemplazar a otro en algunas aplicaciones. Otro factor que da lugar a la sustitución de los materiales es el descubrimiento de un material nuevo con propiedades especiales para algunas aplicaciones. Como resultado, al cabo de un periodo determinado, cambia el uso de distintos materiales.

En la figura 1.14 se muestra gráficamente cómo ha variado la producción de seis materiales en Estados Unidos con base en las toneladas producidas. La producción de aluminio y polímeros muestra un notable aumento desde 1930. Con base en el volumen, el aumento en la producción de aluminio y polímeros se acentúa aún más dado que son materiales ligeros.

La competencia entre materiales es patente si se observa la composición del automóvil estadounidense. En 1978, el automóvil estadounidense medio pesaba 4 000 libras (1 800 kg) y constaba de 60% de hierro y acero fundidos, entre 10 y 20% de plásticos y entre 3 y 5% de aluminio. En contraste, el automóvil estadounidense de 1985 pesaba en promedio 3 100 libras (1 400 kg) y constaba de 50 a 60% de hierro y ace-

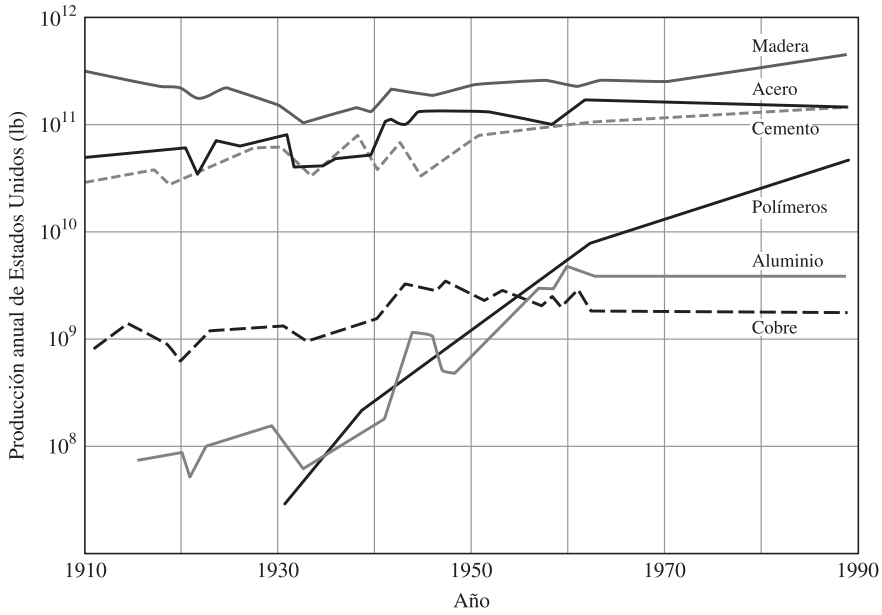


Figura 1.14
Competencia entre seis de los principales materiales en Estados Unidos, con base en su producción anual (en libras). Es evidente el acelerado aumento en la producción de aluminio y polímeros (plásticos).

ro fundidos, entre 10 y 20% de plásticos y entre 5 y 10% de aluminio. Así, en el periodo 1978-1985 el porcentaje de acero disminuyó, el de los polímeros se incrementó y el del aluminio permaneció casi constante. En 1997, el peso medio del automóvil estadounidense era de 3 248 libras (1 476 kg), y los plásticos representaba alrededor de 7.4% de ese peso (figura 1.15). La tendencia a emplear materiales en automóviles parece ir en aumento en aluminio y acero y ser menor en acero *fundido*. La cantidad de plásticos (en porcentaje) en automóviles parece ser casi la misma (figura 1.16).

En algunas aplicaciones, sólo determinados materiales cumplen los requisitos técnicos de un diseño y, además, estos materiales pueden ser relativamente caros. Por ejemplo, un moderno motor a reacción de avión (figura 1.5) necesita para funcionar de superaleaciones de alta temperatura con base en níquel. Estos materiales son costosos y no se ha encontrado ningún sustituto barato para reemplazarlos. Por ello, aunque el costo es un factor importante en el diseño técnico, los materiales empleados deben reunir también especificaciones de desempeño. La sustitución de un material por otro continuará en el futuro, ya que se están descubriendo nuevos materiales y se inventarán nuevos procesos.

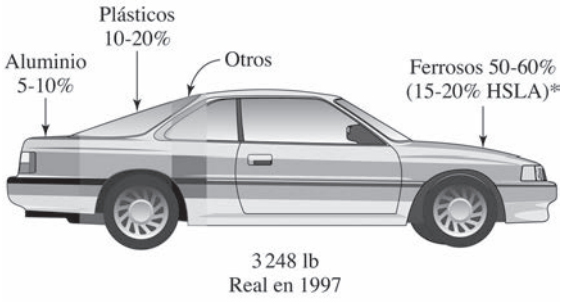


Figura 1.15
Desglose de los porcentajes en peso de los principales materiales empleados en el automóvil medio estadounidense en 1985.
**HSLA: acero de baja aleación de alta resistencia*

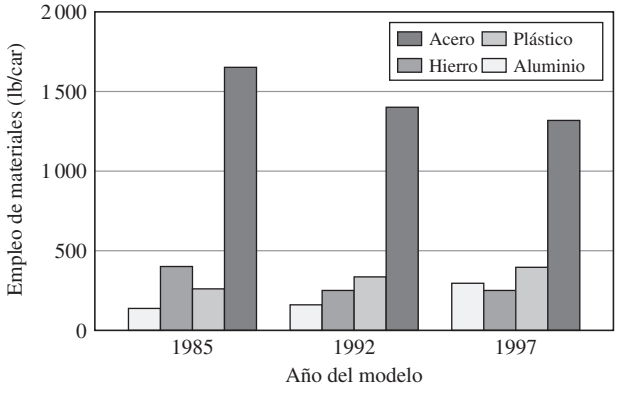


Figura 1.16
Predicciones y empleo de los materiales en automóviles en Estados Unidos.
(Según J.G. Simon, Adv. Mat & Proc., 133:63[1988] y datos nuevos.)

1.5 AVANCES RECIENTES EN LA CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES Y TENDENCIAS FUTURAS

En las últimas décadas han surgido varias iniciativas interesantes en la ciencia de los materiales que podrían revolucionar el futuro de este campo. Los materiales y dispositivos inteligentes a escala de tamaño micrométrico, así como los nanomateriales, son dos clases que afectarán profundamente a todas las industrias principales.

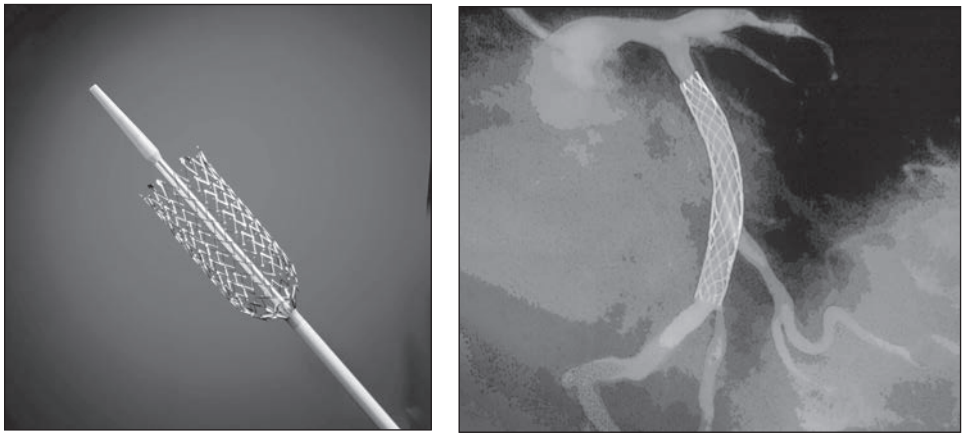
1.5.1 Materiales inteligentes

Algunos materiales han estado presentes durante años pero hoy día se están encontrando más aplicaciones para ellos. Tienen la capacidad de detectar estímulos ambientales externos (temperatura, esfuerzo, luz, humedad y campos eléctricos y magnéticos) y como respuesta a éstos modifican sus propiedades (mecánicas, eléctricas o su aspecto), su estructura o sus funciones. Estos materiales se denominan genéricamente **materiales inteligentes**. Los materiales inteligentes o los sistemas que los emplean están formados por detectores y accionadores. El componente detector descubre un cambio en el ambiente y el accionador realiza una función o emite una respuesta específica. Por ejemplo, algunos materiales inteligentes cambian de color o lo producen al exponerse a cambios de temperatura, intensidad de la luz o una corriente eléctrica.

Algunos de los materiales inteligentes más importantes, desde una perspectiva tecnológica, que pueden hacer las veces de accionadores, son las **aleaciones con memoria de forma** y las cerámicas **piezoeléctricas**. Ya coladas, las aleaciones con memoria de forma regresan a su forma original después de un aumento de temperatura superior a una temperatura de transformación crítica. El regreso a la forma original se debe a un cambio en la estructura cristalina por encima de la temperatura de transformación. Una aplicación biomédica de las aleaciones con memoria de forma se da en la endoprótesis vascular para sostener paredes arteriales debilitadas o para expandir arterias obstruidas (figura 1.17). La endoprótesis deformada se coloca con una sonda dentro de la arteria en la posición adecuada y luego se expande a su forma y tamaño originales después de que alcanza la temperatura corporal. A modo de comparación, el método convencional de expandir o dar soporte a una arteria es mediante el empleo de un tubo de acero inoxidable que se expande con un globo. Son ejemplos de aleaciones con memoria de forma las de níquel y titanio, y las de cobre-zinc-aluminio.

Los accionadores pueden ser también materiales piezoeléctricos. Los materiales producen un campo eléctrico cuando se les expone a una fuerza mecánica. A la inversa, un cambio en un campo eléctrico externo producirá en el mismo material una respuesta mecánica. Estos materiales pueden emplearse para detectar y reducir vibraciones indeseables de un componente por medio de la respuesta de su accionador. Cuando se detecta una vibración, se aplica una corriente para producir una respuesta mecánica que compensa el efecto de aquélla.

Considérese ahora el diseño y creación de sistemas a escala micrométrica que emplean materiales y dispositivos inteligentes con la finalidad de detectar, comunicar y accionar: así es el mundo de los **sistemas microelectromecánicos** (MEM). En un principio, los MEM eran dispositivos que integraban tecnología, materiales electrónicos y materiales inteligentes en un chip semiconductor para producir lo que se conocía comúnmente por **micromáquinas**. Para el dispositivo original de los MEM se fabricaban los elementos mecánicos microscópicos sobre chips de silicio median-



a) *b*)

Figura 1.17
Aleaciones con memoria de forma empleadas como endoprótesis vasculares para expandir arterias obstruidas o dar soporte a arterias débiles: *a*) endoprótesis de prueba, *b*) endopróteis posicionada en una arteria dañada para soportarla.
*(*Fuente*: http://www.designinsite.dk/htmsider/inspmat.htm.)*
Por cortesía de Nitinol Devices & Components © Sovereign/Phototake NYC

te la tecnología de circuitos integrados. Los MEM se empleaban como detectores o accionadores. Sin embargo, hoy el término "MEM" se ha ampliado para incluir cualquier dispositivo miniaturizado. Las aplicaciones de los MEM son numerosas, e incluyen microbombas, sistemas de bloqueo, motores, espejos y detectores. Por ejemplo, los MEM se emplean en las bolsas de aire para automóviles, con la finalidad de detectar tanto la desaceleración como el tamaño de la persona que está en el automóvil y para abrir la bolsa cuando se alcanza la velocidad apropiada.

1.5.2 Nanomateriales

Suelen definirse como aquellos que tienen una escala de longitudes característica (esto es, diámetro de las partículas, tamaño de los granos, el espesor de las capas, etc.) menor a 100 nm (1 nm = 10^{-9} m). Los nanomateriales pueden ser metálicos, poliméricos, cerámicos, electrónicos o compuestos. A este respecto, los agregados de polvo cerámico de tamaño menor a 100 nm, los metales a granel con tamaños de grano menores de 100 nm, las películas poliméricas delgadas de menos de 100 nm de espesor, y los alambres electrónicos de diámetro menor de 100 nm se consideran nanomateriales o materiales nanoestructurados. En la nanoescala, las propiedades del material no tienen escala molecular o atómica, ni las del material a granel. Aunque en la década anterior se realizaron notables esfuerzos en investigación y desarrollo acerca de esta cuestión, las primeras investigaciones sobre nanomateriales se remontan a la década de 1960 cuando los hornos de llama químicos se emplearon para producir partículas de tamaño menor a una micra (1 micra = 10^{-6} m = 10^{3} nm). Las primeras aplicaciones de los nanomateriales fueron en forma de catalizadores químicos y pigmentos. Los técnicos metalúrgicos han estado conscientes siempre de que al refinar la estructura de los granos de un metal hasta alcanzar niveles ultrafinos (escala submicrónica), su resistencia y dureza aumentan considerablemente en comparación con el metal a granel de grano

grueso (escala micrónica). Por ejemplo, el cobre puro nanoestructurado tiene un límite de elasticidad seis veces mayor que el del cobre de grano grueso.

La extraordinaria atención que se ha prestado recientemente a estos materiales puede deberse a la creación de (1) nuevos instrumentos que permiten la observación y caracterización de estos materiales y (2) a los nuevos métodos de procesado y síntesis de los materiales nanoestructurados que permiten a los investigadores producir estos materiales con mayor facilidad y a una mayor tasa de rendimiento.

La imaginación es el único límite en las futuras aplicaciones de los nanomateriales, y uno de los principales obstáculos para que alcancen sus posibilidades es la capacidad para producir estos materiales de manera eficiente y barata. Considérese la fabricación de implantes ortopédicos y dentales a partir de nanomateriales con mejores características de biocompatibilidad, mayor resistencia y mejores características con respecto al desgaste de los metales. Uno de estos materiales es la circonia nanocristalina (óxido de circonio), un material cerámico duro y resistente al desgaste que es químicamente estable y biocompatible. Este material puede elaborarse en forma porosa y, al emplearse como material de implantes, permite que el hueso crezca en sus poros, lo cual redunda en una fijación más estable. Las aleaciones metálicas que se emplean hoy día en esta aplicación no permiten una interacción de este tipo y suelen aflojarse con el paso del tiempo, lo que hace necesaria una nueva cirugía. Los nanomateriales también pueden emplearse para producir pinturas o materiales de revestimiento que son considerablemente más resistentes a la abrasión y al daño del medio ambiente. Además, podrán crearse en un nanoalambre dispositivos electrónicos como diodos transistores e incluso de láser. Estos adelantos en la ciencia de los materiales tendrán repercusiones técnicas y económicas en todos los campos de la ingeniería y en todos los sectores industriales.

¡Bienvenido al fascinante e interesantísimo mundo de la ciencia e ingeniería de los materiales!

1.6 DISEÑO Y SELECCIÓN

Los ingenieros especialistas en materiales deben conocer varias clases de éstos, sus propiedades, estructuras, los métodos de fabricación pertinentes, las cuestiones ambientales y económicas, y muchas otras cosas. A medida que aumenta la complejidad de un componente que se esté estudiando, aumenta también la complejidad del análisis y los factores que se incluyen en el procedimiento de selección de materiales. Considérense los aspectos relativos a la selección de materiales para el cuadro y las horquillas de una bicicleta. El material seleccionado debe ser lo suficientemente sólido para resistir la carga sin dar de sí (deformación permanente) ni fractura. El material elegido debe ser rígido para resistir la deformación elástica excesiva y la rotura por fatiga (debido a las cargas repetidas). La resistencia a la corrosión del material puede ser un elemento que debe tomarse en cuenta durante la vida de la bicicleta. Asimismo, el peso del cuadro es importante si la bicicleta se usa para carreras: debe ser liviana. ¿Qué materiales satisfarán todos los requisitos anteriores? Una selección adecuada de materiales debe tomar en cuenta las cuestiones de resistencia, rigidez, peso y forma del componente (factor de la forma) y emplear cuadros de selección de materiales para determinar el material más adecuado para la aplicación. La selección pormenorizada queda fuera del ámbito de este libro de texto, pero se incluye este ejemplo a modo de ejercicio para identificar varios materiales candidatos para esta aplicación. Resulta que muchos materiales pueden satisfacer las consideraciones so-

bre resistencia, rigidez y peso, incluyendo las aleaciones de aluminio, aleaciones de titanio, aleaciones de magnesio, acero, plástico reforzado con fibra de carbono (CFRP, por sus siglas en inglés) e incluso la madera. La madera tiene excelentes propiedades para la aplicación pero no es fácil darle la forma del cuadro y las horquillas. Un análisis adicional demuestra que el CFRP es la mejor elección: ofrece un cuadro resistente, rígido y liviano que resiste tanto la fatiga como la corrosión. Sin embargo, la fabricación resulta costosa. Por lo tanto, si el costo es un factor a considerar, este material no puede ser la elección más adecuada. Los materiales restantes, todas aleaciones metálicas, son adecuados y, en comparación, resulta fácil fabricarlos con la forma deseada. Por un lado, si el costo es importante, el acero es la elección idónea. Por otro lado, si lo importante es producir una bicicleta más liviana, la aleación de aluminio es el material idóneo. Las aleaciones de titanio y magnesio son más costosas que las aleaciones tanto de aluminio como de acero, y son más ligeras que el acero; sin embargo, no ofrecen ventajas considerables respecto al aluminio.

1.7 R E S U M E N

La ciencia e ingeniería de los materiales (en conjunto, ciencia e ingeniería de los materiales) tiende un puente entre el conocimiento acerca de los materiales y las ciencias básicas (y las matemáticas) y las disciplinas de la ingeniería. La ciencia de los materiales se interesa primordialmente por el conocimiento básico sobre los materiales, mientras que la ingeniería de los materiales se interesa por el empleo de conocimiento aplicado sobre éstos.

Las tres clases principales de materiales son metálicos, poliméricos y cerámicos. Dos clases más de materiales, muy importantes en la tecnología moderna, son los materiales compuestos y los electrónicos. En este libro se estudian todas estas clases de materiales. Los materiales inteligentes y los nanomateriales se presentan como nuevas clases que tienen nuevas e importantes aplicaciones en muchas industrias.

Los materiales compiten entre sí en los mercados actuales y en los nuevos, y, en consecuencia, se produce la sustitución de un material por otro en algunas aplicaciones. La disponibilidad de materias primas, el costo de fabricación y el descubrimiento de nuevos materiales y métodos de elaboración de productos son factores importantes que causan cambios en el empleo de los materiales.

1.8 DEFINICIONES

Sección 1.1

Materiales: sustancias de las que algo está compuesto o hecho. El término *ingeniería de los materiales* se refiere en ocasiones concretamente a los materiales empleados en la fabricación de productos técnicos. Sin embargo, no existe una línea de demarcación clara entre las dos nociones y se emplean indistintamente.

Sección 1.2

Ciencia de los materiales: disciplina científica que se interesa primordialmente por la búsqueda del conocimiento básico acerca de la estructura interna, las propiedades y la elaboración de los materiales.

Ingeniería de los materiales: disciplina de ingeniería que se interesa primordialmente por el empleo del conocimiento fundamental y aplicado de los materiales, con la finalidad de convertirlos en productos necesarios o deseados por una sociedad.

Materiales metálicos (metales y aleaciones metálicas): materiales inorgánicos que se caracterizan por tener alta conductividad térmica y eléctrica. Son ejemplos: hierro, acero, aluminio y cobre.

Sección 1.3

Aleaciones y metales ferrosos: metales y aleaciones que contienen un alto porcentaje de hierro, como hierros forjados y aceros.

Aleaciones y metales no ferrosos: metales y aleaciones que no contienen hierro o, si lo contienen, es sólo en un porcentaje relativamente pequeño. Son ejemplos de metales no ferrosos: aluminio, cobre, zinc, titanio y níquel.

Superaleaciones: aleaciones metálicas con desempeño superior a temperaturas elevadas y a altos niveles de esfuerzo.

Materiales cerámicos: materiales formados por compuestos de elementos metálicos y no metálicos. Los materiales metálicos suelen ser duros y frágiles. Son ejemplos de materiales cerámicos: productos de arcilla, vidrio y óxido de aluminio puro que se ha compactado y densificado.

Materiales poliméricos: materiales que constan de largas cadenas moleculares o redes constituidas de elementos de bajo peso, como carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. La mayoría de los materiales poliméricos tienen baja conductividad eléctrica. Pueden citarse como ejemplos el polietileno y el *cloruro de polivinilo* (PVC).

Materiales compuestos: materiales que son mezclas de dos o más materiales. Por ejemplo, materiales a base de fibra de vidrio que refuerza a una matriz de poliéster o de resina epóxica.

Materiales electrónicos: materiales empleados en electrónica, en especial en microelectrónica. Son ejemplos el silicio y el arseniuro de galio.

Mezclas: mezclas de dos o más polímeros, también llamadas aleaciones de polímeros.

Cerámicas mejoradas: nueva generación de cerámicas con mayor resistencia al esfuerzo, a la corrosión, y mejores propiedades de choque térmico, también se les llama cerámicas de ingeniería o estructurales.

Sección 1.5

Materiales inteligentes: materiales que tienen la capacidad de detectar y responder a los estímulos externos.

Aleaciones con memoria de forma: materiales que se pueden deformar pero regresan a su forma original cuando la temperatura se incrementa.

Cerámicas piezoeléctricas: materiales que producen un campo eléctrico cuando se someten a una fuerza mecánica (y viceversa).

Sistemas microelectromecánicos (MEM): cualquier dispositivo miniaturizado que ejecuta una función de detección y/o de actuación.

Micromáquina: MEM que ejecuta un trabajo o función específicos.

Nanomateriales: materiales con una escala de longitud menor a los 100 nm.

1.9 PROBLEMAS

1.1 ¿Qué son los materiales? Enumere ocho materiales de empleo generalizado en ingeniería.

1.2 Defina la ciencia de los materiales e ingeniería de los materiales.

1.3 ¿Cuáles son las clases principales de materiales en ingeniería?

1.4 ¿Cuáles son algunas de las propiedades importantes de cada uno de estos materiales?

1.5 Defina un material compuesto. Dé un ejemplo.

1.6 Mencione algunos cambios en el empleo de materiales que haya observado, durante un periodo, en algunos productos manufacturados. ¿Qué razones puede dar para explicar los cambios ocurridos?

1.7 ¿Qué factores podrían causar que las predicciones acerca del empleo de los materiales fuesen incorrectas?

1.10 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. Considere el componente habitual de una bombilla en casa: *a*) identifique varios componentes críticos de este elemento, *b*) determine el material seleccionado para cada componente crítico y *c*) diseñe un procedimiento para montar la bombilla.

2. La *artroplastia total de cadera* (THA) es el procedimiento de sustitución total de una cadera dañada por una prótesis artificial. *a*) Identifique los componentes reemplazados en la THA. *b*) Identifique el material o materiales empleados en la fabricación de cada componente y las razones por las cuales se emplean. *c*) Mencione cuáles son algunos de los factores que el ingeniero de materiales debe tomar en cuenta en la selección de materiales.

3. Se considera que los transistores han causado una revolución en la electrónica y, en consecuencia, en muchas otras industrias. *a*) Identifique los componentes críticos de un transistor de unión. *b*) Identifique el material empleado en la fabricación de cada componente.

4. *a*) Mencione los factores más importantes que deben tomarse en cuenta en la selección de materiales para el cuadro de una bicicleta de montaña. *b*) Tome en cuenta que el acero, el aluminio y el titanio se han empleado como los metales principales en la estructura de una bicicleta y determine las principales ventajas y desventajas de cada uno de ellos. *c*) Las bicicletas más modernas se fabrican con materiales compuestos avanzados. Explique por qué y mencione los materiales compuestos específicos empleados en la estructura de una bicicleta.

5. *a*) Mencione los criterios más importantes para seleccionar materiales que habrán de emplearse en un casco protector de uso deportivo. *b*) Identifique los materiales que podrían satisfacer estos criterios. *c*) ¿Por qué un casco de metal sólido no sería una buena elección?

6. *a*) Determine las propiedades que debe tener el material o los materiales empleados como protección térmica en la estructura de un transbordador espacial. *b*) Identifique los materiales que podrían satisfacer estos criterios. *c*) ¿Por qué las aleaciones de titanio no serían una buena elección para esta aplicación?

7. *a*) ¿Qué tipo de material es el cobre de alta conductividad exento de oxígeno (OFHC)? *b*) ¿Cuáles son las propiedades deseables en el cobre de alta conductividad exentas de oxígeno? *c*) ¿Cuáles son sus aplicaciones en la industria eléctrica?

8. *a*) ¿A qué clase de materiales pertenece el politetrafluoretileno? *b*) ¿Cuáles son sus propiedades deseables? *c*) ¿Cuáles son sus aplicaciones en la industria de fabricación de utensilios de cocina?

9. *a*) ¿A qué clase de materiales pertenece el *nitruro de boro cúbico* (cBN)? *b*) ¿Cuáles son sus propiedades deseables? *c*) ¿Cuáles son sus aplicaciones en la industria metalmecánica?

10. *a*) ¿Qué son las aramidas? *b*) ¿Cuáles son sus propiedades deseables? *c*) ¿Cuáles son sus aplicaciones en las industrias de equipo deportivo?

11. *a*) ¿A qué clase de materiales pertenece el arseniuro de galio (GaAs)? *b*) ¿Cuáles son sus propiedades deseables? *c*) ¿Cuáles son sus aplicaciones en la industria electrónica?

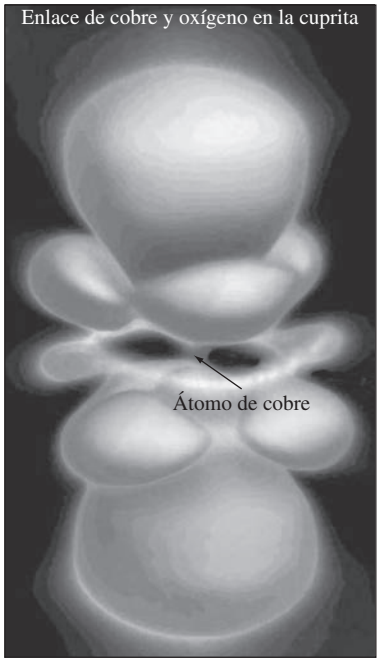
12. Las superaleaciones con base en níquel se emplean en la estructura de los motores de turbina de los aviones. ¿Cuáles son las propiedades principales de este metal que lo hacen deseable para esta aplicación?

13. Identifique varios equipos deportivos que podrían beneficiarse con los materiales inteligentes o con la tecnología de los MEM. Mencione las razones concretas de la idoneidad de la aplicación.

14. ¿Qué son los nanotubos? Mencione algunos ejemplos de su aplicación a materiales estructurales como los compuestos.

CAPÍTULO

2 Estructura atómica y enlace



(© Tom Pantages adaptación/por cortesía del profesor J. Spence)

Los orbitales atómicos representan la probabilidad estadística de que los electrones ocupen diversos puntos en el espacio. Salvo por los electrones más internos de los átomos, las formas de los orbitales no son esféricas. Hasta hace poco sólo se podía imaginar la existencia y la forma de estos orbitales, dado que no se contaba con pruebas experimentales. Recientemente, los científicos han podido crear imágenes tridimensionales de estos orbitales, empleando para ello una combinación de técnicas de difracción de rayos X y microscopia electrónica. Este capítulo comienza con una imagen que muestra el orbital de estado de electrones *d* para el enlace de cobre y oxígeno en el Cu_2O. Mediante el conocimiento de los enlaces en los óxidos de cobre, empleando las técnicas mencionadas, los investigadores se acercan cada vez más a la explicación de la naturaleza de la superconductividad en los óxidos de cobre.[1] ■

[1] www.aip.org/physnews/graphics/html/orbital.html

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Describir la naturaleza y la estructura de un átomo, así como su estructura electrónica.
2. Describir los diversos tipos de enlaces primarios, inclusive iónicos, covalentes y metálicos.
3. Describir el enlace covalente por carbono.
4. Describir diversos tipos de enlaces secundarios y establecer una diferencia entre éstos y los enlaces primarios.
5. Describir el efecto del tipo de enlace y la resistencia en el rendimiento mecánico y eléctrico de distintas clases de materiales.
6. Describir los enlaces mixtos en los materiales.

2.1 LA ESTRUCTURA DE LOS ÁTOMOS

Animación

Ahora se examinarán algunos de los principios de la estructura atómica, dado que los **átomos** son la unidad estructural básica de todos los materiales de ingeniería.

Los átomos constan principalmente de tres partículas subatómicas: *protones, neutrones* y *electrones*. El actual modelo simple de un átomo considera un núcleo muy pequeño de aproximadamente 10^{-14} m de diámetro, rodeado por una nube de electrones relativamente poco dispersa y de densidad variable, de tal suerte que el diámetro del átomo es del orden de 10^{-10} m. El núcleo constituye casi toda la masa del átomo y contiene protones y neutrones. Un protón tiene una masa de 1.673×10^{-24} g y una carga unitaria de $+1.602 \times 10^{-19}$ culombios (C). El neutrón es ligeramente más pesado que el protón y tiene una masa de 1.675×10^{-24} g, pero no tiene carga. El electrón tiene una masa relativamente pequeña de 9.109×10^{-28} g ($\frac{1}{1836}$ de la del protón) y una carga unitaria de -1.602×10^{-19} C (con la misma carga, pero de signo opuesto a la del protón). En la tabla 2.1 se resumen estas propiedades de las partículas subatómicas.

La nube de carga electrónica constituye así casi todo el volumen del átomo, pero sólo representa una parte muy pequeña de su masa. Los electrones, en especial los más externos, determinan la mayoría de las propiedades eléctricas, mecánicas, químicas y térmicas de los átomos y, por consiguiente, es importante un conocimiento básico de la estructura atómica para el estudio de los materiales de ingeniería.

Tabla 2.1 La masa y la carga del protón, neutrón y electrón

	Masa, gramos (g)	Carga, culombios (C)
Protón	1.673×10^{-24}	$+1.602 \times 10^{-19}$
Neutrón	1.675×10^{-24}	0
Electrón	9.109×10^{-28}	-1.602×10^{-19}

2.2 NÚMEROS ATÓMICOS Y MASAS ATÓMICAS

2.2.1 Números atómicos

Prueba

El **número atómico** de un átomo indica el número de protones (partículas cargadas positivamente) que están en su núcleo y en un átomo neutro, el número atómico es también igual al número de electrones de su nube de carga. Cada elemento tiene su propio número atómico característico y, de este modo, el número atómico define al elemento. Los números atómicos de los elementos desde el hidrógeno, que tiene un número atómico de 1, hasta el hahnio, cuyo número atómico es 105, se ubican encima de los símbolos atómicos de los elementos en la tabla periódica de la figura 2.1.

2.2.2 Masas atómicas

La *masa atómica relativa* de un elemento es la masa en gramos de 6.023×10^{23} átomos (**número de Avogadro** N_A) de ese elemento. Las masas atómicas relativas de los elementos, desde el 1 hasta el 105, se localizan debajo de los símbolos atómicos en la tabla periódica de los elementos (figura 2.1). El átomo de carbono, que tiene 6 protones y 6 neutrones, es el átomo de carbono 12 y su masa es la masa de referencia de las masas atómicas. Una **unidad de masa atómica (u)** se define exactamente como un doceavo de la masa de un átomo de carbono que tiene una masa de 12 u. Una masa atómica relativa molar de carbono 12 tiene una masa de 12 g en esta escala. *Un mol-gramo* o *mol* (abreviado, mol) de un elemento se define como el número en gramos de ese elemento igual al número que expresa su masa atómica relativa molar. Así, por ejemplo, 1 mol-gramo de aluminio tiene una masa de 26.98 g y contiene 6.023×10^{23} átomos.

PROBLEMA DE EJEMPLO 2.1

a) ¿Cuál es la masa en gramos de un átomo de cobre?
b) ¿Cuántos átomos de cobre hay en 1 g de cobre?

■ Solución

a) La masa atómica del cobre es de 63.54 g/mol. Dado que en 63.54 g de cobre hay 6.02×10^{23} átomos, el número de gramos en un átomo de cobre es de:

$$\frac{63.54 \text{ g/mol de Cu}}{6.02 \times 10^{23} \text{ átomos/mol}} = \frac{x \text{ g de Cu}}{1 \text{ átomo}}$$

$$x = \text{Núm de masa de 1 átomo de Cu}$$

$$= \frac{63.54 \text{ g/mol}}{6.02 \times 10^{23} \text{ átomos/mol}} \times 1 \text{ átomo} = 1.05 \times 10^{-22} \text{ g} \blacktriangleleft$$

b) El número de átomos de cobre en 1 g de cobre es:

$$\frac{6.02 \times 10^{23} \text{ átomos/mol}}{63.54 \text{ g/mol de Cu}} = \frac{x \text{ átomos de Cu}}{1 \text{ g de Cu}}$$

$$x = \text{Núm de átomos de Cu} = \frac{(6.02 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})\ (1 \text{ g de Cu})}{63.54 \text{ g/mol de Cu}}$$

$$= 9.47 \times 10^{21} \text{ átomos!} \blacktriangleleft$$

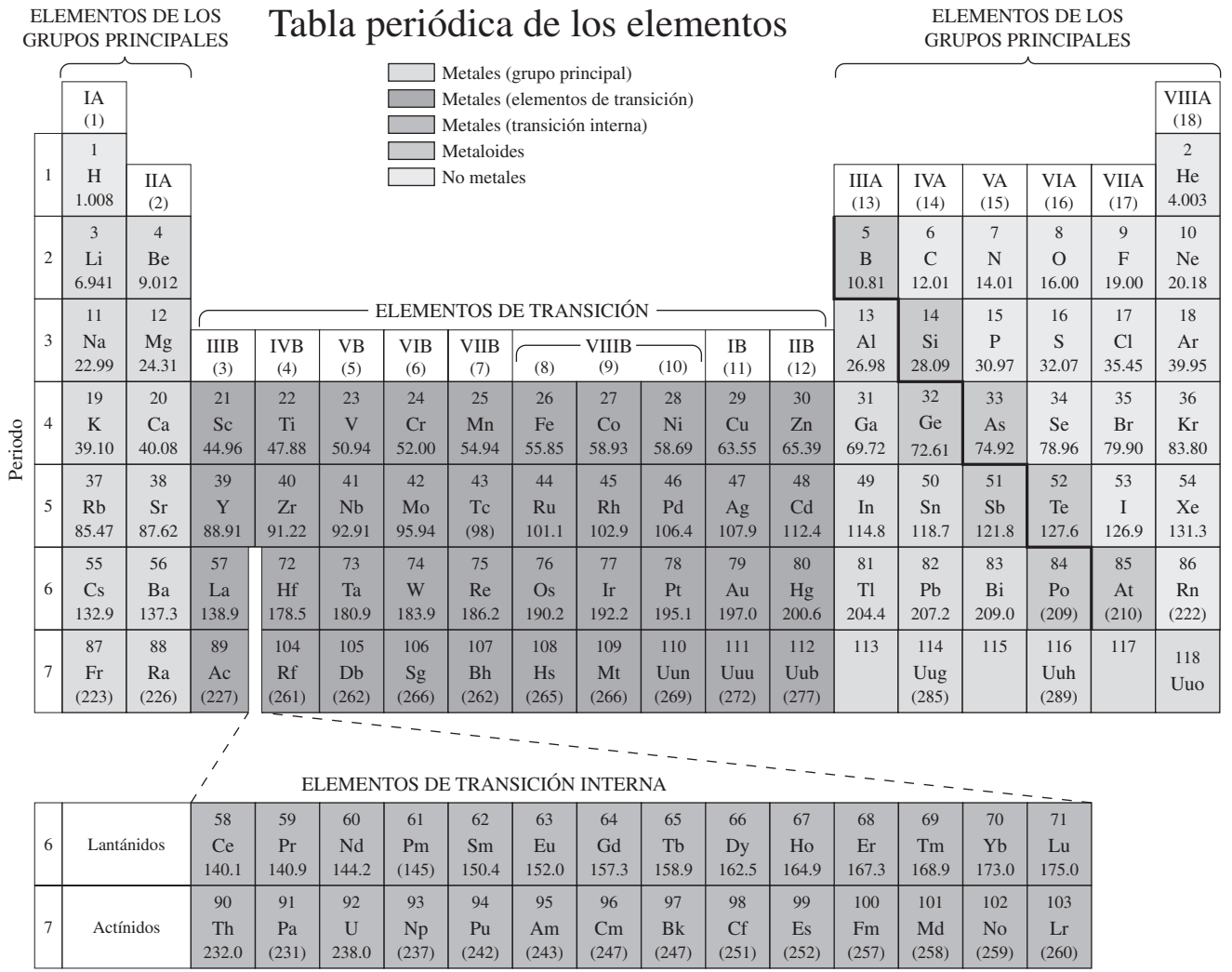


Figura 2.1
La tabla periódica de los elementos.
*(*Fuente: *Davis, M. y Davis, R.,* Fundamentals of Chemical Reaction Engineering, *McGraw-Hill, 2003.)*

PROBLEMA DE EJEMPLO 2.2

El revestimiento (capa exterior) de la moneda de un cuarto de dólar de Estados Unidos está formado por una aleación[2] de 75% en peso de cobre y 25% en peso de níquel. ¿Cuáles son los porcentajes atómicos de Cu y Ni que contiene este material?

■ Solución

Tomando como base 100 g de la aleación de 75% en peso de Cu y 25% en peso de Ni, tiene 75 g de Cu y 25 g de Ni. Por tanto, el número de mol-gramo de cobre y níquel será de:

$$\text{Núm de moles de Cu} = \frac{75\text{ g}}{63.54\text{ g/mol}} = 1.1803\text{ mol}$$

$$\text{Núm de moles de Ni} = \frac{25\text{ g}}{58.69\text{ g/mol}} = \underline{0.4260\text{ mol}}$$

$$\text{Gramos-moles totales} = 1.6063\text{ mol}$$

Por tanto, los porcentajes atómicos de Cu y Ni son:

$$\%\text{ atómico de Cu} = \left(\frac{1.1803\text{ mol}}{1.6063\text{ mol}}\right)(100\%) = 73.5\,\text{de}\,\% \blacktriangleleft$$

$$\%\text{ atómico de Ni} = \left(\frac{0.4260\text{ mol}}{1.6063\text{ mol}}\right)(100\%) = 26.5\,\text{de}\,\% \blacktriangleleft$$

[2] Una aleación es la combinación de dos o más metales, o de un metal (metales) y un no metal (no metales).

PROBLEMA DE EJEMPLO 2.3

Un compuesto intermetálico tiene la fórmula química general $Ni_x\,Al_y$, donde x y y son números enteros simples y está formado por 42.04% en peso de níquel y 57.96% en peso de aluminio. ¿Cuál es la fórmula más sencilla de este compuesto de níquel y aluminio?

■ Solución

Se determinan primero las fracciones molares de níquel y aluminio en este compuesto. Tomando como base 100 g del compuesto, se tienen 42.04 g de Ni y 57.96 de Al.
Por tanto,

$$\text{Núm de moles de Ni} = \frac{42.04\text{ g}}{58.71\text{ g/mol}} = 0.7160\text{ mol}$$

$$\text{Núm de moles de Al} = \frac{57.96\text{ g}}{26.98\text{ g/mol}} = \underline{2.1483\text{ mol}}$$

$$\text{Moles totales} = 2.8643\text{ mol}$$

Por tanto,

$$\text{Fracción molar de Ni} = \frac{0.7160\text{ mol}}{2.8643\text{ mol}} = 0.25$$

$$\text{Fracción molar de Al} = \frac{2.1483\text{ mol}}{2.8643\text{ mol}} = 0.75$$

A continuación se sustituyen la x y la y en el compuesto $Ni_x\ Al_y$ por 0.25 y 0.75, respectivamente, y se obtiene $Ni_{0.25}Al_{0.75}$, que es la fórmula química más simple expresada en fracciones molares. La fórmula química más simple con respecto a una base entera se obtiene multiplicando tanto 0.25 como 0.75 por 4 para obtener $NiAl_3$, que es la fórmula química más simple del aluminuro de níquel.

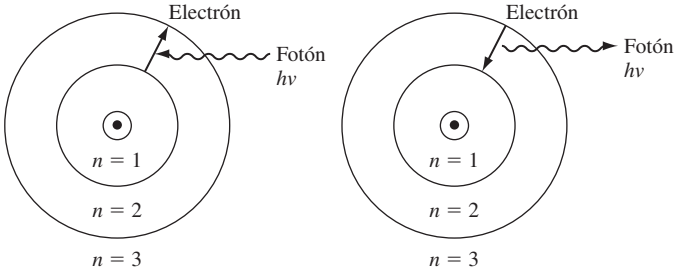
2.3 LA ESTRUCTURA ELECTRÓNICA DE LOS ÁTOMOS

2.3.1 El átomo de hidrógeno

Animación

El átomo de hidrógeno es el átomo más simple y consta de un electrón que rodea a un núcleo de un protón. Si se considera el movimiento del electrón del hidrógeno alrededor de su núcleo, sólo se permiten determinados niveles (orbitales) de energía definidos. Es importante señalar que el término "orbital atómico" no representa la órbita de un electrón alrededor del núcleo; representa tan sólo el estado energético del electrón. La razón de los valores restringidos de energía es que los electrones cumplen las leyes de la **mecánica cuántica** que sólo permiten determinados valores de energía y no cualquier valor arbitrario. De este modo, si el electrón del hidrógeno pasa a un nivel energético superior, se absorbe una cantidad definida de energía (figura 2.2*a*). De igual modo, si el electrón cae a un nivel energético inferior, se emite una cantidad definida de energía (figura 2.2*b*)

Durante la transición a un nivel de energía menor, el electrón del hidrógeno emitirá una cantidad determinada de energía (cuanto) en forma de radiación electromagnética llamada **fotón**. La variación de energía ΔE asociada con la transición del elec-



a) Energía absorbida *b*) Energía emitida

Figura 2.2
a) El electrón de hidrógeno pasa a una órbita superior. *b*) Un electrón cae de una órbita de energía superior a una inferior, y ello causa la emisión de un fotón de energía hv. (Nótese que los anillos que se muestran alrededor del núcleo no indican necesariamente la posición del electrón en el espacio, sino el nivel de energía.)

trón desde un nivel a otro se relaciona con la frecuencia v (nu) del fotón mediante la ecuación de Planck:[3]

$$\Delta E = h\nu \tag{2.1}$$

donde h = constante de Planck = 6.62×10^{-34} joules-segundo (J·s). Dado que para la radiación electromagnética $c = \lambda\nu$, donde c es la velocidad de la luz igual a 3.00×10^8 metros/segundo (m/s) y λ (lambda) es su longitud de onda, la variación de energía ΔE asociada con un fotón puede expresarse así:

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda} \tag{2.2}$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 2.4

Calcule la energía en julios (J) y electrón-voltios (eV) del fotón cuya longitud de onda λ es de 123.6 nanómetros (nm). ($1.00\,\text{eV} = 1.60 \times 10^{-19}\,\text{J}$; $h = 6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s}$; $1\,\text{nm} = 10^{-9}\,\text{m}$.)

■ **Solución**

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda} \tag{2.2}$$

$$\Delta E = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^8\,\text{m/s})}{(121.6\,\text{nm})(10^{-9}\,\text{m/nm})}$$

$$= 1.63 \times 10^{-18}\,\text{J} \blacktriangleleft$$

$$= 1.63 \times 10^{-18}\,\text{J} \times \frac{1\,\text{eV}}{1.60 \times 10^{-19}\,\text{J}} = 10.2\,\text{eV} \blacktriangleleft$$

La verificación experimental de las energías asociadas con los electrones que son excitados a determinados niveles superiores de energía o que pierden energía y caen a niveles determinados más bajos, se logra principalmente mediante el análisis de las longitudes de onda e intensidades de las líneas espectrales. Utilizando los datos del espectro del hidrógeno, Niels Bohr[4] desarrolló en 1913 un modelo de átomo de hidrógeno que constaba de un solo electrón que giraba alrededor de un protón con un radio fijo (figura 2.3). Una buena aproximación a la energía del electrón del hidrógeno a niveles de energía permitidos se logra mediante la ecuación de Bohr:

$$E = -\frac{2\pi^2 me^4}{n^2h^2} = -\frac{13.6}{n^2}\,\text{eV} \qquad (n = 1, 2, 3, 4, 5, \ldots) \tag{2.3}$$

donde: e = carga del electrón
m = masa del electrón
n = número entero denominado *número cuántico principal*

[3] Max Ernst Planck (1858-1947). Físico alemán quien recibió el Premio Nobel de Física en 1918 por su teoría cuántica.

[4] Niels Henrik Bohr (1885-1962). Físico danés. Fue uno de los fundadores de la física moderna. En 1922 recibió el Premio Nobel de Física por su teoría sobre el átomo de hidrógeno.

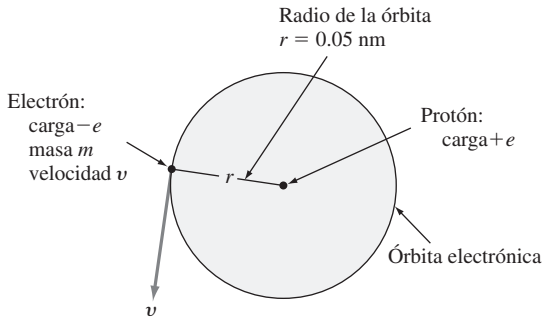


Figura 2.3
Átomo de hidrógeno de Bohr. En el átomo de hidrógeno de Bohr, un electrón describe una órbita circular de 0.05 nm de radio alrededor de un protón central.

Prueba

PROBLEMA DE EJEMPLO 2.5

Un átomo de hidrógeno existe con su electrón en el estado $n = 3$. El electrón pasa a un estado $n = 2$. Calcule *a*) la energía del fotón emitido, *b*) su frecuencia y *c*) su longitud de onda.

■ Solución

a) La energía del fotón emitido es:

$$E = \frac{-13.6\ \text{eV}}{n^2} \tag{2.3}$$

$$\Delta E = E_3 - E_2$$

$$= \frac{-13.6}{3^2} - \frac{-13.6}{2^2} = 1.89\ \text{eV} \blacktriangleleft$$

$$= 1.89\ \text{eV} \times \frac{1.60 \times 10^{-19}\ \text{J}}{\text{eV}} = 3.02 \times 10^{-19}\ \text{J} \blacktriangleleft$$

b) La frecuencia del fotón es:

$$\Delta E = h\nu \tag{2.1}$$

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{3.02 \times 10^{-19}\ \text{J}}{6.63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}$$

$$= 4.55 \times 10^{14}\ \text{s}^{-1} = 4.55 \times 10^{14}\ \text{Hz} \blacktriangleleft$$

c) La longitud de onda del fotón es:

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda} \tag{2.2}$$

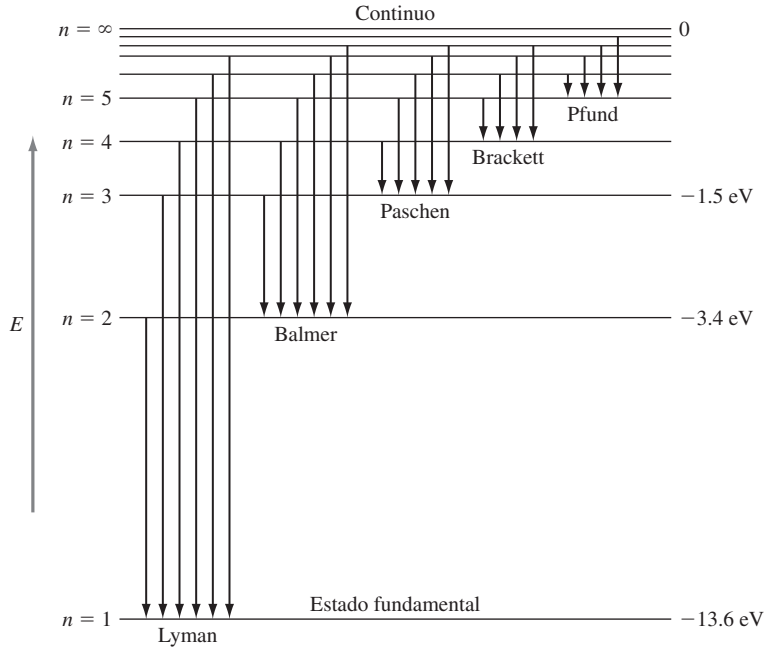
o

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s})(3.00 \times 10^{8}\ \text{m/s})}{3.02 \times 10^{-19}\ \text{J}}$$

$$= 6.59 \times 10^{-7}\ \text{m}$$

$$= 6.59 \times 10^{-7}\ \text{m} \times \frac{1\ \text{nm}}{10^{-9}\ \text{m}} = 659\ \text{nm} \blacktriangleleft$$

d) Esta transición emite energía.



Prueba
Animación

Figura 2.4
Diagrama de niveles de energía para el espectro de líneas del hidrógeno.
(Según F.M Miller, "Chemistry: Structure and Dynamics", McGraw-Hill, 1984, p. 141.)

En la teoría atómica moderna, la n de la ecuación de Bohr se denomina *número cuántico principal* y representa los niveles energéticos principales de los electrones en los átomos. Partiendo de la ecuación de Bohr (2.3), el nivel de energía del electrón del hidrógeno en su **estado básico** es de 13.6 eV y corresponde a la línea donde $n = 1$ en el diagrama de los niveles energéticos del hidrógeno (figura 2.4). Cuando el electrón del hidrógeno es excitado y pasa a niveles energéticos superiores, su energía aumenta pero su valor numérico es menor. Por ejemplo, cuando el electrón del hidrógeno es excitado y pasa al segundo nivel cuántico principal, su energía es de -3.4 eV, y si el electrón se excita hasta alcanzar el estado libre, donde $n = \infty$, el electrón tendrá un valor energético nulo. La energía necesaria para sacar por completo al electrón del átomo de hidrógeno es de -13.6 eV, que es la **energía de ionización** del electrón del hidrógeno.

El movimiento de los electrones dentro de los átomos es más complicado que el presentado por el modelo atómico simple de Bohr. Los electrones pueden describir órbitas que no sean circulares alrededor del núcleo, y de acuerdo con el **principio de incertidumbre de Heisenberg**,[5] la posición y el momento (masa $\times$ velocidad) de una partícula diminuta, como el electrón, no pueden determinarse simultáneamente. Por tanto, no puede determinarse la posición exacta del electrón en algún momento dado, debido a que es una partícula muy pequeña. Dada la imposibilidad de deter-

[5] Werner Kart Heisenberg (1901-1976). Físico alemán. Fue uno de los fundadores de la teoría cuántica moderna. En 1932 recibió el Premio Nobel de Física.

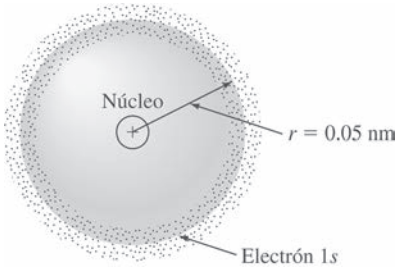


Figura 2.5
Nube de carga electrónica (esquema) que rodea el núcleo de un átomo de carbono en su estado fundamental. El círculo exterior de $r = 0.05$ nm corresponde al radio de la primera órbita de Bohr (es decir, para $n = 1$) e indica la región donde con mayor probabilidad podrá encontrarse el electrón.

minar con exactitud la posición del electrón del hidrógeno, suele emplearse una distribución de la densidad de la nube de carga electrónica para representar la posición de éste en su movimiento en torno a su núcleo (figura 2.5). La mayor densidad de carga electrónica está en el núcleo. Sin embargo, si el volumen que rodea al núcleo se divide en muchas capas esféricas concéntricas, la probabilidad de hallar electrones es mayor en un radio de unos 0.05 nm, que corresponde al radio de Bohr del átomo de hidrógeno.

2.3.2 Números cuánticos de los electrones atómicos

Prueba

La teoría atómica moderna señala que el **número cuántico** no es el único elemento que caracteriza el movimiento de un electrón en torno a su núcleo y su energía, sino que también participan cuatro números cuánticos: principal n, secundario l, magnético m_l y de spin m_s.

El número cuántico principal *n* El número cuántico principal n corresponde a la n de la ecuación de Bohr. Representa los niveles energéticos principales del electrón o las órbitas. Cuanto mayor sea el valor de n, mayor será la energía electrónica y la posibilidad de que el electrón esté más alejado del núcleo. Los valores de n son números enteros positivos y varían entre 1 y 7.

El número cuántico secundario *l* El segundo número cuántico es el cuántico secundario l. Este número cuántico especifica los subniveles de energía dentro de los niveles energéticos principales (subórbita) donde la probabilidad de encontrar un electrón es alta si ese nivel energético está ocupado. Los valores permitidos de l son

$l = 0, 1, 2, 3, \ldots, n - 1$. Las letras *s, p, d* y *f* se emplean[6] para denominar los subniveles energéticos l de la siguiente manera:

Número de denominación	$l = 0$	1	2	3
Letra de denominación	$l = s$	p	d	f

Los subniveles energéticos *s, p, d* y *f* de un electrón se denominan **orbitales**, de tal suerte que se habla, por ejemplo, de un subnivel energético *s* o *p*. El término *orbital* también se refiere a un suborbital de un átomo donde hay una alta densidad de un electrón determinado, o de un par de electrones. Por tanto, se puede hablar de una subórbita *s* o *p* de un átomo determinado.

El número cuántico magnético m_l El tercer número cuántico, el m_l, define la orientación espacial de un orbital atómico y afecta poco la energía de un electrón. El número de las distintas orientaciones permitidas a un orbital depende del valor de l en un orbital determinado. El número cuántico m_l tiene valores permisibles entre $-l$ y $+l$, incluso cero. Cuando $l = 0$, sólo hay un valor permitido para m_l, que es cero. Cuando $l = 1$, hay tres valores permitidos para m_l, que son $-1, 0$, y $+1$. En general, hay $2l + 1$ valores permitidos para m_l. En términos de la notación de los orbitales *s, p, d* y *f*, hay un máximo de un orbital *s*, tres orbitales *p*, cinco orbitales *d* y siete orbitales *f* para cada uno de los subniveles energéticos *s, p, d* y *f* permitidos.

El número cuántico de giro del electrón m_s El cuarto número cuántico, el de spin m_s, expresa las dos direcciones de giro permitidas para el giro del electrón en torno a su propio eje. Las direcciones son en el sentido de las manecillas del reloj y en sentido contrario y sus valores permitidos son $+\frac{1}{2}$ y $-\frac{1}{2}$. El número cuántico de spin tiene un efecto menor en la energía del electrón. Debe señalarse que dos electrones pueden ocupar el mismo orbital y, si ocurre eso, deben tener los spines (giros) opuestos.

En la tabla 2.2 se resumen los valores permitidos para los cuatro números cuánticos de los electrones. De acuerdo con el **principio de exclusión de Pauli**,[7] de la teoría atómica, *dos electrones no pueden tener los cuatro números cuánticos iguales*.

---

[6] Se adoptaron las letras *s*, *p*, *d* y *f* de las primeras letras de la antigua denominación de intensidad de la línea espectral en inglés: *s*harp (agudo), *p*rincipal (principal), *d*iffuse y *f*undamental (fundamental).

[7] Wolfang Pauli (1900-1958). Físico austriaco, fue uno de los fundadores de la teoría cuántica moderna. En 1945 recibió el Premio Nobel de Física.

Tabla 2.2 Valores permitidos para los números cuánticos de los electrones

n	Número cuántico principal	$n = 1, 2, 3, 4, \ldots$	Todos los enteros positivos
l	Número cuántico secundario	$l = 0, 1, 2, 3, \ldots, n - 1$	de valores permitidos de l
m_l	Número cuántico magnético	Valores enteros desde $-l$ a $+l$, incluyendo el cero	$2l + 1$
m_s	Número cuántico de spin	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2

2.3.3 Estructura electrónica de átomos multielectrónicos

Prueba

Número máximo de electrones por cada nivel atómico principal Los átomos constan de niveles* principales de altas densidades electrónicas, como lo dictan las leyes de la mecánica cuántica. Existen siete de estos niveles principales cuando el número **máximo de electrones** alcanza 87 para el elemento francio (Fr). Cada nivel sólo puede contener un número máximo de electrones, que también viene dado por las leyes de la mecánica cuántica. El número máximo de electrones que puede ubicarse en cada nivel atómico se define por los diferentes grupos de los cuatro números cuánticos (principio de Pauli) y es $2n^2$, donde n es el número cuántico principal. De este modo, sólo puede haber un máximo de 2 electrones en el primer orbital principal, 8 en el segundo, 18 en el tercero, 32 en el cuarto, etc., como se indica en la tabla 2.3.

Animación

Tamaño atómico Cada átomo puede considerarse en una primera aproximación como una esfera con radio definido. El radio de una esfera atómica no es constante, ya que depende hasta cierto punto de su entorno. En la figura 2.6 se muestran los tamaños atómicos relativos de muchos de los elementos junto con sus radios atómicos. Muchos de los valores de los radios atómicos no concuerdan y varían en alguna medida dependiendo de la fuente de referencia.

Al observar la figura 2.6 se hacen evidentes algunas tendencias en los tamaños atómicos. En general, a medida que aumenta el número cuántico principal, crece el tamaño del átomo. Se dan, sin embargo, algunas excepciones en las que el tamaño atómico en realidad se reduce. Los elementos alcalinos del grupo 1A de la tabla periódica (figura 2.1) son un buen ejemplo de átomos cuyo tamaño crece con el incremento de n. Por ejemplo, el litio ($n = 2$) tiene un radio atómico de 0.157 nm, mientras que el cesio ($n = 6$) tiene un radio atómico de 0.270 nm. Al recorrer la tabla periódica desde un elemento del grupo de alcalinos 1A hasta un gas noble del grupo 8A, el tamaño atómico, en general, disminuye. Sin embargo, de nuevo hay algunas excepciones. El tamaño atómico será importante en el estudio de la difusión atómica en aleaciones metálicas.

Configuración electrónica de los elementos La **configuración electrónica** de un átomo representa la distribución de los electrones en sus orbitales. Las configuraciones electrónicas están escritas en una notación convencional que enumera en primer lugar al del número cuántico principal, seguido de una letra que indica el orbital *s,*

*El término nivel no indica el espacio, sino más bien el nivel de energía.

Tabla 2.3 Número máximo de electrones para cada nivel atómico principal

Número de capa, n (número cuántico principal)	Número máximo de electrones en cada capa ($2n^2$)	Número máximo de electrones en los orbitales
1	$2(1^2) = 2$	s^2
2	$2(2^2) = 8$	s^2p^6
3	$2(3^2) = 18$	$s^2p^6d^{10}$
4	$2(4^2) = 32$	$s^2p^6d^{10}f^{14}$
5	$2(5^2) = 50$	$s^2p^6d^{10}f^{14}\ldots$
6	$2(6^2) = 72$	$s^2p^6\ldots$
7	$2(7^2) = 98$	$s^2\ldots$

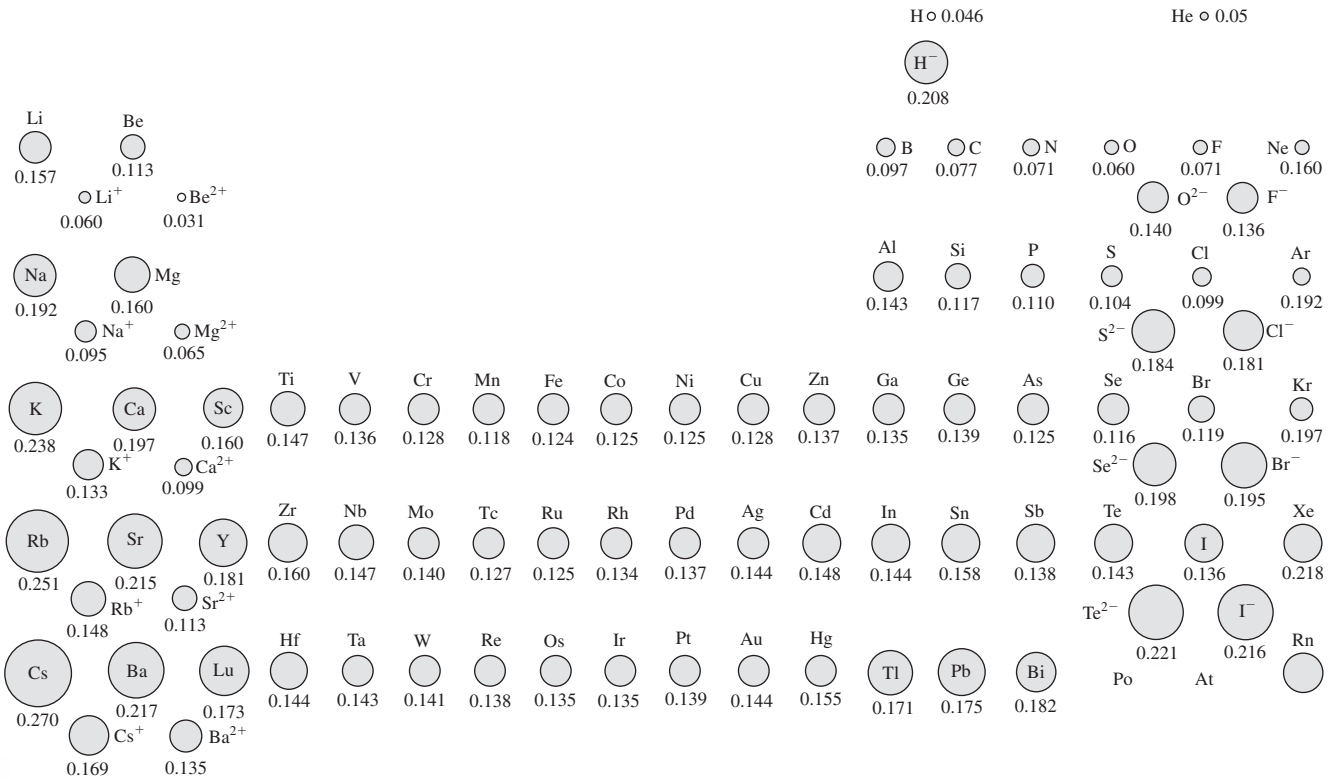


Figura 2.6
Tamaños relativos de algunos átomos y iones. Los valores se dan en nanómetros para los radios de los átomos y de los iones. Donde es aplicable, se incluyen los radios metálicos para los átomos.
(Adaptado de F. M. Miller, "Chemistry; Structure and Dynamics", *McGraw-Hill, 1984, p. 176.)*

Animación

p, d o *f*. Una cifra escrita sobre la letra del orbital indica el número de electrones que contiene. El orden de llenado de los orbitales es el siguiente:[8]

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6 7s^2 5f^{14} 6d^{10} 7p^6$$

En este libro, el orden a seguir para escribir los orbitales de las configuraciones electrónicas será con base en el incremento del número cuántico principal, así:

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 4f^{14} 5s^2 5p^6 5d^{10} 5f^{14} 6s^2 6p^6 6d^{10} 7s^2$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 2.6

Escriba las configuraciones electrónicas de los elementos *a*) hierro, $Z = 26$ y *b*) samario, $Z = 62$.

■ Solución

Si se emplea el orden de llenado de orbital expuesto previamente, las configuraciones electrónicas para estos elementos son las siguientes:

Hierro ($Z = 26$): $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$

Obsérvese que los orbitales 3*d* están incompletos. La distribución de los electrones $3d^6$ en el átomo de hierro será importante al estudiar el ferromagnetismo.

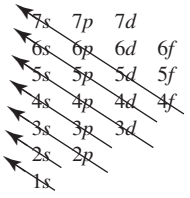
Samario ($Z = 62$): $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 4f^6 5s^2 5p^6 6s^2$

Obsérvese que para este elemento de las tierras raras, los orbitales 4*f* están incompletos. La gran similitud de las propiedades químicas de los elementos de las tierras raras se debe al llenado de los orbitales 4*f* que forman dos capas por abajo de la capa exterior que contiene dos electrones 6*s*.

En la tabla 2.4 aparecen las configuraciones electrónicas de los elementos como se han determinado experimentalmente. Se observa que existen pequeñas irregularidades inconsistentes con el sistema de llenado tradicional. Por ejemplo, el cobre ($Z = 29$) tiene la configuración electrónica externa $3d^{10}4s^1$. Podría esperarse que fuera $3d^9 4s^2$, de acuerdo con el sistema especificado. No se conocen con certeza las razones de estas irregularidades.

Los datos experimentales muestran también que los electrones con el mismo número cuántico secundario tienen tantos spines paralelos como es posible. Por tanto, si hay cinco electrones en los orbitales *d*, habrá un electrón en cada orbital *d*, y las direcciones del giro de todos los electrones serán paralelas, como se muestra en la figura 2.7.

[8] Un recurso nemotécnico útil para seguir el orden correcto es disponer los orbitales como se muestra abajo y emplear una serie de flechas dibujadas sobre los orbitales. Si se siguen las flechas de cola a cabeza, el orden queda establecido.

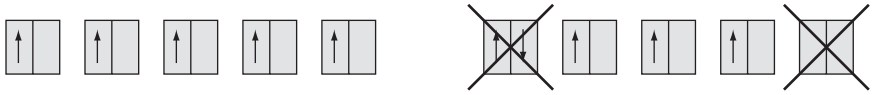


Prueba

Tabla 2.4 Configuraciones electrónicas de los elementos

Z	Elemento	Configuración del elemento	Z	Elemento	Configuración del elemento	Z	Elemento	Configuración del elemento
1	H	$1s$	38	Sr	$[Kr]5s^2$	75	Re	$[Xe]4f^{14}5d^56s^2$
2	He	$1s^2$	39	Y	$[Kr]4d5s^2$	76	Os	$[Xe]4f^{14}5d^66s^2$
3	Li	$[He]2s$	40	Zr	$[Kr]4d^25s^2$	77	Ir	$[Xe]4f^{14}5d^76s^2$
4	Be	$[He]2s^2$	41	Nb	$[Kr]4d^45s$	78	Pt	$[Xe]4f^{14}5d^96s$
5	B	$[He]2s^22p$	42	Mo	$[Kr]4d^55s$	79	Au	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s$
6	C	$[He]2s^22p^2$	43	Tc	$[Kr]4d^55s^2$	80	Hg	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^2$
7	N	$[He]2s^22p^3$	44	Ru	$[Kr]4d^75s$	81	Tl	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p$
8	O	$[He]2s^22p^4$	45	Rh	$[Kr]4d^85s$	82	Pb	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^2$
9	F	$[He]2s^22p^5$	46	Pd	$[Kr]4d^{10}$	83	Bi	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^3$
10	Ne	$[He]2s^22p^6$	47	Ag	$[Kr]4d^{10}5s$	84	Po	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^4$
11	Na	$[Ne]3s$	48	Cd	$[Kr]4d^{10}5s^2$	85	At	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^5$
12	Mg	$[Ne]3s^2$	49	In	$[Kr]4d^{10}5s^25p$	86	Rn	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^6$
13	Al	$[Ne]3s^23p$	50	Sn	$[Kr]4d^{10}5s^25p^2$	87	Fr	$[Rn]7s$
14	Si	$[Ne]3s^23p^2$	51	Sb	$[Kr]4d^{10}5s^25p^3$	88	Ra	$[Rn]7s^2$
15	P	$[Ne]3s^23p^3$	52	Te	$[Kr]4d^{10}5s^25p^4$	89	Ac	$[Rn]6d7s^2$
16	S	$[Ne]3s^23p^4$	53	I	$[Kr]4d^{10}5s^25p^5$	90	Th	$[Rn]6d^27s^2$
17	Cl	$[Ne]3s^23p^5$	54	Xe	$[Kr]4d^{10}5s^25p^6$	91	Pa	$[Rn]5f^26d7s^2$
18	Ar	$[Ne]3s^23p^6$	55	Cs	$[Xe]6s$	92	U	$[Rn]5f^36d7s^2$
19	K	$[Ar]4s$	56	Ba	$[Xe]6s^2$	93	Np	$[Rn]5f^46d7s^2$
20	Ca	$[Ar]4s^2$	57	La	$[Xe]5d6s^2$	94	Pu	$[Rn]5f^67s^2$
21	Sc	$[Ar]3d4s^2$	58	Ce	$[Xe]4f5d6s^2$	95	Am	$[Rn]5f^77s^2$
22	Ti	$[Ar]3d^24s^2$	59	Pr	$[Xe]4f^26s^2$	96	Cm	$[Rn]5f^76d7s^2$
23	V	$[Ar]3d^34s^2$	60	Nd	$[Xe]4f^46s^2$	97	Bk	$[Rn]5f^97s^2$
24	Cr	$[Ar]3d^54s$	61	Pm	$[Xe]4f^56s^2$	98	Cf	$[Rn]5f^{10}7s^2$
25	Mn	$[Ar]3d^54s^2$	62	Sm	$[Xe]4f^66s^2$	99	Es	$[Rn]5f^{11}7s^2$
26	Fe	$[Ar]3d^64s^2$	63	Eu	$[Xe]4f^76s^2$	100	Fm	$[Rn]5f^{12}7s^2$
27	Co	$[Ar]3d^74s^2$	64	Gd	$[Xe]4f^75d6s^2$	101	Md	$[Rn]5f^{13}7s^2$
28	Ni	$[Ar]3d^84s^2$	65	Tb	$[Xe]4f^96s^2$	102	No	$[Rn]5f^{14}7s^2$
29	Cu	$[Ar]3d^{10}4s$	66	Dy	$[Xe]4f^{10}6s^2$	103	Lr	$[Rn]5f^{14}6d7s^2$
30	Zn	$[Ar]3d^{10}4s^2$	67	Ho	$[Xe]4f^{11}6s^2$	104	Rf	$[Rn]5f^{14}6d^27s^2$
31	Ga	$[Ar]3d^{10}4s^24p$	68	Er	$[Xe]4f^{12}6s^2$	105	Db	$[Rn]5f^{14}6d^37s^2$
32	Ge	$[Ar]3d^{10}4s^24p^2$	69	Tm	$[Xe]4f^{13}6s^2$	106	Sg	$[Rn]5f^{14}6d^47s^2$
33	As	$[Ar]3d^{10}4s^24p^3$	70	Yb	$[Xe]4f^{14}6s^2$	107	Bh	$[Rn]5f^{14}6d^57s^2$
34	Se	$[Ar]3d^{10}4s^24p^4$	71	Lu	$[Xe]4f^{14}5d6s^2$	108	Hs	$[Rn]5f^{14}6d^67s^2$
35	Br	$[Ar]3d^{10}4s^24p^5$	72	Hf	$[Xe]4f^{14}5d^26s^2$	109	Mt	$[Rn]5f^{14}6d^77s^2$
36	Kr	$[Ar]3d^{10}4s^24p^6$	73	Ta	$[Xe]4f^{14}5d^36s^2$			
37	Rb	$[Kr]5s$	74	W	$[Xe]4f^{14}5d^46s^2$			

Handbook of Chemistry & Physics, 76a. ed., CRC Press 1995–1996.



Orbitales *d* mostrados con la disposición electrónica correcta

Orbitales *d* mostrados con la disposición electrónica *incorrecta*

Figura 2.7
Direcciones de los giros de los electrones desapareados en orbitales *d*.

2.3.4 Estructura electrónica y reactividad química

Gases nobles Las propiedades químicas de los átomos de los elementos dependen principalmente de la reactividad de sus electrones más externos. Los gases nobles son los más estables y menos reactivos de todos los elementos. Con la excepción del helio, que tiene una configuración electrónica $1s^2$, la capa exterior de los otros gases nobles (Ne, Ar, Kr, Xe y Rn) tiene una configuración electrónica s^2p^6. Esta configuración s^2p^6 para la capa más externa dota de una alta estabilidad química, como se ha puesto de manifiesto en la relativa inactividad química de los gases nobles para reaccionar con otros átomos.

Elementos electropositivos y electronegativos Los elementos electropositivos son metálicos por naturaleza y ceden electrones en las reacciones químicas para producir *iones positivos* o **cationes**. El número de electrones cedidos por átomo electropositivo de un elemento se indica por un *número de oxidación positivo*. En la figura 2.8 se indican los números de oxidación para los elementos; obsérvese que algunos elementos tienen más de un número de oxidación. Los elementos más electropositivos están en los grupos 1A y 2A de la tabla periódica.

Los elementos electronegativos son no metálicos en esencia y aceptan electrones en las reacciones químicas para producir *iones negativos* o **aniones**. El número de electrones aceptados por un átomo electronegativo de un elemento es indicado por un *número de oxidación negativo* (figura 2.8). Los elementos más electronegativos están en los grupos 6A y 7A de la tabla periódica en la figura 2.1.

Algunos elementos de los grupos 4A hasta 7A de la tabla periódica pueden comportarse de manera electropositiva o electronegativa. Este comportamiento doble se presenta en elementos tales como el carbono, silicio, germanio, arsénico, antimonio y fósforo. Así, en algunas reacciones tienen número de oxidación positivo, donde muestran comportamiento electropositivo, y en otras tienen números de oxidación negativos, donde muestran comportamiento electronegativo.

PROBLEMA DE EJEMPLO 2.7

Escriba la configuración electrónica para el átomo de hierro ($Z = 26$) y de los iones Fe^{2+} y Fe^{3+} empleando la notación convencional *spdf*.

■ Solución

$$\text{Fe:}\quad 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$$
$$\text{Fe}^{2+}\text{:}\ 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6$$
$$\text{Fe}^{3+}\text{:}\ 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5$$

Obsérvese que los dos elementos externos 4*s* son los que se pierden primero, ya que son los que tienen mayor energía y son los más fáciles de eliminar.

Figura 2.8
Números de oxidación de los elementos con respecto a sus posiciones en la tabla periódica.
(Según R. E. Davis, K. D. Gailey y K. W. Whitten, "Principles of Chemistry", CBS College Publishing, 1984, p. 299.)

Electronegatividad La *electronegatividad* se define como la capacidad de un átomo para atraer electrones hacia sí. La tendencia comparativa de un átomo a mostrar un comportamiento electropositivo o electronegativo puede cuantificarse asignando a cada elemento un número de electronegatividad. La electronegatividad se mide en una escala de 0 hasta 4.1 y a cada elemento se le asigna un valor en esta escala, como se muestra en la figura 2.9. Los elementos más electropositivos son los metales

																H 2.1
Li 1.0	**Be** 1.5											**B** 2.0	**C** 2.5	**N** 3.1	**O** 3.5	**F** 4.1
Na 1.0	**Mg** 1.3											**Al** 1.5	**Si** 1.8	**P** 2.1	**S** 2.4	**Cl** 2.9
K 0.9	**Ca** 1.1	**Sc** 1.2	**Ti** 1.3	**V** 1.5	**Cr** 1.6	**Mn** 1.6	**Fe** 1.7	**Co** 1.7	**Ni** 1.8	**Cu** 1.8	**Zn** 1.7	**Ga** 1.8	**Ge** 2.0	**As** 2.2	**Se** 2.5	**Br** 2.8
Rb 0.9	**Sr** 1.0	**Y** 1.1	**Zr** 1.2	**Nb** 1.3	**Mo** 1.3	**Tc** 1.4	**Ru** 1.4	**Rh** 1.5	**Pd** 1.4	**Ag** 1.4	**Cd** 1.5	**In** 1.5	**Sn** 1.7	**Sb** 1.8	**Te** 2.0	**I** 2.2
Cs 0.9	**Ba** 0.9	**La** 1.1	**Hf** 1.2	**Ta** 1.4	**W** 1.4	**Re** 1.5	**Os** 1.5	**Ir** 1.6	**Pt** 1.5	**Au** 1.4	**Hg** 1.5	**Tl** 1.5	**Pb** 1.6	**Bi** 1.7	**Po** 1.8	**At** 2.0
Fr 0.9	**Ra** 0.9	**Ac** 1.0	Lantánidos: 1.0–1.2 Actínidos: 1.0–1.2													

Figura 2.9
Electronegatividades de los elementos.
(Según F. M. Miller, "Chemistry: Structure and Dynamics", McGraw-Hill, 1984, p. 185.)

alcalinos, cuyas electronegatividades van desde 0.9 para el cesio, rubidio y potasio, hasta 1.0 para sodio y litio. Los más electronegativos son el flúor, oxígeno y nitrógeno, que tienen electronegatividades de 4.1, 3.5 y 3.1, respectivamente. El concepto de electronegatividad ayuda a comprender los tipos de enlace de los elementos.

Resumen de algunas relaciones entre estructuras electrónicas y propiedades químicas para metales y no metales.

Metales	No metales
1. Tienen algunos electrones en los niveles externos, generalmente tres o menos	1. Tienen cuatro o más electrones en los niveles externos
2. Forman cationes por pérdida de electrones	2. Forman aniones por ganancia de electrones
3. Tienen bajas electronegatividades	3. Tienen altas electronegatividades

2.4 TIPOS DE ENLACES ATÓMICOS Y ENLACES MOLECULARES

El enlace químico entre átomos ocurre debido a la disminución neta de la energía potencial de los átomos en estado enlazado. Esto significa que los átomos en estado enlazado están en condiciones energéticas más estables que cuando están libres. En general, los enlaces químicos entre los átomos pueden dividirse en dos grupos: primarios (enlaces fuertes) y secundarios (enlaces débiles).

2.4.1 Enlaces atómicos primarios

Los enlaces atómicos primarios, en los cuales intervienen grandes fuerzas interatómicas, pueden subdividirse en las tres clases siguientes:

1. *Enlaces iónicos.* En este tipo de enlace intervienen fuerzas interatómicas relativamente grandes debidas a la transferencia de un electrón de un átomo a otro produciéndose iones que se mantienen unidos por fuerzas culombianas (atracción de iones cargados positiva y negativamente). El enlace iónico es un enlace no direccional relativamente fuerte.

2. *Enlaces covalentes.* Corresponden a fuerzas interatómicas relativamente grandes creadas cuando se comparten electrones para formar un enlace con una dirección localizada.

3. *Enlaces metálicos.* Implican fuerzas interatómicas relativamente grandes creadas cuando se comparten electrones en forma deslocalizada para formar un enlace fuerte no direccional entre los átomos.

2.4.2 Enlaces atómicos secundarios y moleculares

1. *Enlaces de dipolo permanente.* Corresponden a enlaces intermoleculares relativamente débiles que se forman entre moléculas que tienen dipolos permanentes. El dipolo en una molécula existe debido a la asimetría en la distribución de su densidad electrónica.

2. *Enlaces dipolares variables.* Entre los átomos puede formarse un enlace dipolar muy débil debido a la distribución asimétrica de las densidades electrónicas alrededor de sus núcleos. A este tipo de enlaces se les llama *variables* debido a que la densidad electrónica continuamente cambia con el tiempo.

2.5 ENLACE IÓNICO

2.5.1 Enlace iónico en general

Animación

Los **enlaces iónicos** pueden formarse entre elementos muy electropositivos (metálicos) y elementos muy electronegativos (no metálicos). En el proceso de ionización, los electrones se transfieren desde los átomos de los elementos electropositivos a los átomos de los elementos electronegativos, produciendo cationes cargados positivamente y aniones cargados negativamente. Las fuerzas iónicas de enlace son debidas a la fuerza de atracción electrostática o culombiana entre iones con carga opuesta. Los enlaces iónicos se forman entre iones con cargas opuestas porque se produce una disminución neta de la energía potencial para los iones enlazados.

Prueba

Un ejemplo de un sólido que tiene alto grado de enlace iónico es el cloruro de sodio (NaCl). En el proceso de ionización para formar un par iónico Na^+Cl^- un átomo de sodio pierde su electrón más extremo $3s^1$ y lo transfiere a un orbital $3p$, que esté parcialmente ocupado en un átomo de cloro, produciendo un par de iones Na^+ y Cl^- (figura 2.10).

En el proceso de ionización, el átomo de sodio que originalmente tenía un radio de 0.192 nm se ve reducido en tamaño al de un catión de sodio con un radio de 0.095 nm, y el átomo de cloro que originalmente tenía un radio de 0.099 nm, se expande transformándose en el anión cloruro con un radio de 0.181 nm.

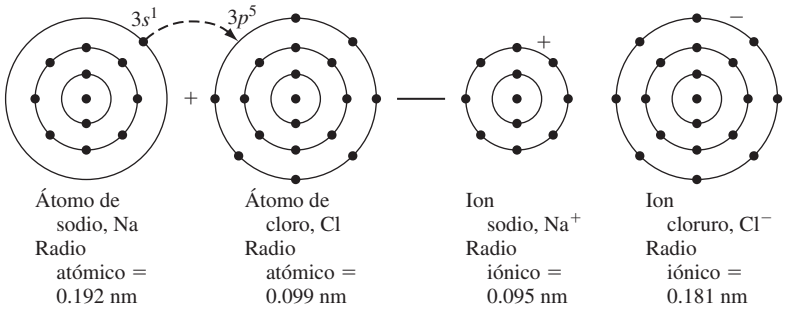


Figura 2.10
Formación de un par iónico de cloruro de sodio a partir de átomos de cloro y sodio. En el proceso de ionización, un electrón $3s^1$ del átomo de sodio se *transfiere* a un orbital 3*p* semivacío del átomo de cloro. (Los anillos indican el nivel de energía del electrón, no la posición.)

El átomo de sodio se reduce de tamaño cuando se forma el ion debido a la pérdida del electrón más externo de su capa $3s^1$ y también a causa de la reducción de la relación electrón a protón. El núcleo del ion sodio, más positivamente cargado, atrae fuertemente hacia sí la nube de carga electrónica, dando lugar a una reducción del tamaño del átomo durante la ionización. Por el contrario, durante la ionización, el átomo de cloro se expande debido a un aumento en la relación protón-electrón. En el proceso de la ionización, los átomos reducen su tamaño cuando forman cationes y crecen en tamaño cuando forman aniones, como se muestra para varios átomos en la figura 2.6.

2.5.2 Fuerzas interiónicas para un par de iones

Animación

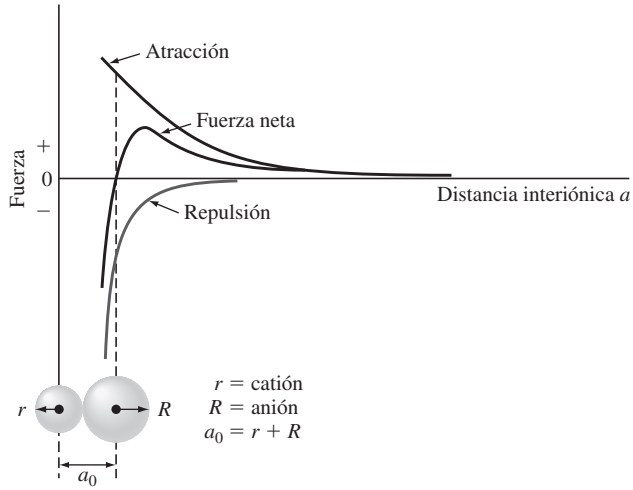
Considere un par de iones con carga opuesta (por ejemplo, un par iónico Na^+Cl^-) que se aproximan entre sí desde una gran distancia con separación *a*. A medida que los iones se acercan, serán atraídos entre sí por fuerzas culombianas. Esto significa que el núcleo de un ion atraerá la carga de la nube electrónica del otro y viceversa. Cuando los iones se aproximen aún más, a la larga, sus dos nubes electrónicas interaccionarán y aparecerán fuerzas de repulsión. Cuando las fuerzas atractivas igualen a las fuerzas de repulsión, no habrá fuerza neta entre los iones y éstos permanecerán a una distancia de equilibrio, la distancia interiónica a_0. En la figura 2.11 se muestran esquemáticamente las curvas de fuerza en función de la separación para un par de iones.

La fuerza neta entre un par de iones con carga opuesta es igual a la suma de las fuerzas atractivas y repulsivas. Por tanto,

$$F_{\text{neta}} = F_{\text{atractivas}} + F_{\text{repulsivas}} \qquad \textbf{(2.4)}$$

La fuerza atractiva entre el par de iones es la fuerza culombiana que resulta cuando los iones son considerados como cargas puntuales. Aplicando la ley de Coulomb[9] con unidades del SI, puede escribirse la siguiente ecuación:

[9] Charles Augustin Coulomb (1736-1806). Físico francés, demostró experimentalmente que la fuerza entre dos cuerpos cargados variaba inversamente con el cuadrado de la distancia entre ellos.



Animación

Figura 2.11
Fuerza frente a distancia de separación para un par de iones con cargas opuestas. La distancia interiónica de equilibrio a_0 se alcanza cuando la fuerza entre los iones es nula.

La siguiente ecuación puede escribirse:

$$F_{\text{atractiva}} = -\frac{(Z_1 e)(Z_2 e)}{4\pi\epsilon_0 a^2} = -\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 a^2} \tag{2.5}$$

donde: $Z_1, Z_2 =$ Número de electrones cedidos o aceptados por los átomos durante la formación del ion

$e =$ Carga del electrón

$a =$ Distancia de separación interiónica

$\epsilon_0 =$ Permitividad en el vacío $= 8.85 \times 10^{-12}\ \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$

La fuerza de repulsión entre un par de iones ha resultado de forma experimental inversamente proporcional a la distancia de separación interiónica a y puede describirse por la ecuación:

$$F_{\text{repulsiva}} = -\frac{nb}{a^{n+1}} \tag{2.6}$$

donde a es la distancia de separación interiónica y b y n son constantes; n varía generalmente desde 7 a 9 y es 9 para el NaCl.

Al sustituir las ecuaciones (2.5) y (2.6) en la (2.4) se tendrá la fuerza neta entre el par iónico:

$$\boxed{F_{\text{neta}} = -\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 a^2} - \frac{nb}{a^{n+1}}} \tag{2.7}$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 2.8

Calcule la fuerza de atracción culombiana (●► ◄●) entre un par de iones Na^+ y Cl^- que acaban de hacer contacto. Considérese que el radio del ion Na^+ es 0.095 nm y el del ion Cl^- es 0.181 nm.

■ Solución

La fuerza atractiva entre los iones Na^+ y Cl^- puede calcularse si se sustituyen los valores apropiados en la ecuación de la ley de Coulomb (2.5).

$$Z_1 = +1 \text{ para } Na^+ \qquad Z_2 = -1 \text{ para } Cl^-$$
$$e = 1.60 \times 10^{-19}\,\text{C} \qquad \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\,\text{C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$$
$$\begin{aligned} a_0 &= \text{suma de los radios de los iones de } Na^+ \text{ y } Cl^- \\ &= 0.095\,\text{nm} + 0.181\,\text{nm} \\ &= 0.276\,\text{nm} \times 10^{-9}\,\text{m/nm} = 2.76 \times 10^{-10}\,\text{m} \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} F_{\text{atractiva}} &= -\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 a_0^2} \\ &= -\frac{(+1)(-1)(1.60 \times 10^{-19}\,\text{C})^2}{4\pi[8.85 \times 10^{-12}\,\text{C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2)](2.76 \times 10^{-10}\,\text{m})^2} \\ &= +3.02 \times 10^{-9}\,\text{N} \blacktriangleleft \end{aligned}$$

De este modo, la fuerza atractiva (●► ◄●) entre los iones resulta $+3.02 \times 10^{-9}$ N. La fuerza de repulsión (◄●●►) será igual y de signo opuesto y por tanto su valor será de -3.02×10^{-9} N.

PROBLEMA DE EJEMPLO 2.9

Si la fuerza atractiva entre un par de iones Mg^{2+} y S^{2-} es 1.49×10^{-8} N y si el ion S^{2-} tiene un radio de 0.184 nm, calcule un valor para el radio iónico del ion Mg^{2+} en nanómetros.

■ Solución

El valor de a_0, como suma de los radios iónicos del Mg^{2+} y del S^{2-}, puede calcularse mediante un reordenamiento de la ecuación de la ley de Coulomb (2.5):

$$a_0 = \sqrt{\frac{-Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 F_{\text{atractiva}}}}$$
$$Z_1 = +2 \text{ para } Mg^{2+} \qquad Z_2 = -2 \text{ para } S^{2-}$$
$$|e| = 1.60 \times 10^{-19}\,\text{C} \qquad \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\,\text{C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$$
$$F_{\text{atractiva}} = 1.49 \times 10^{-9}\,\text{N}$$

De este modo,

$$\begin{aligned} a_0 &= \sqrt{\frac{-(2)(-2)(1.60 \times 10^{-19}\,\text{C})^2}{4\pi[8.85 \times 10^{-12}\,\text{C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2)](1.49 \times 10^{-8}\,\text{N})}} \\ &= 2.49 \times 10^{-10}\,\text{m} = 0.249\,\text{nm} \end{aligned}$$
$$a_0 = r_{Mg^{2+}} + r_{S^{2-}}$$

o
$$0.249\,\text{nm} = r_{Mg^{2+}} + 0.184\,\text{nm}$$
$$r_{Mg^{2+}} = 0.065\,\text{nm} \blacktriangleleft$$

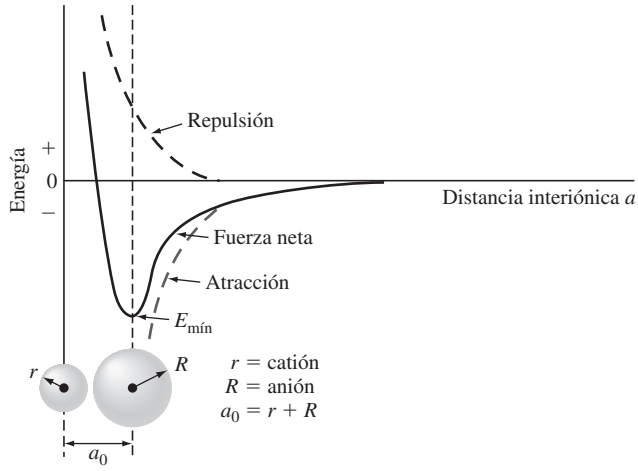


Figura 2.12
Energía en función de la distancia de separación para un par de iones con cargas opuestas. La distancia de separación interiónica de equilibrio, a_0 se alcanza cuando la energía potencial total es mínima.

2.5.3 Energías interiónicas para un par de iones

Animación

La energía potencial neta E entre un par de iones con cargas opuestas, por ejemplo, Na^+Cl^-, a las que se les acerca hasta estar muy juntos, es igual a la suma de las energías asociadas con la atracción y la repulsión de los iones y puede escribirse en forma de ecuación como:

$$E_{neta} = \underbrace{+\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 a}}_{\substack{\text{Energía}\\ \text{atractiva}}} + \underbrace{\frac{b}{a^n}}_{\substack{\text{Energía}\\ \text{repulsiva}}} \qquad \textbf{(2.8)}$$

El término de la energía de atracción de la ecuación 2.8 representa la energía liberada cuando los iones se acercan y es negativa porque el producto de $(+Z_1)(-Z_2)$ es negativo. El término de la energía de repulsión de la ecuación 2.8 representa la energía absorbida cuando los iones se aproximan y es positiva. La suma de las energías asociadas con la atracción y repulsión de los iones es igual a la energía neta, que es mínima cuando los iones están separados a la distancia de separación de equilibrio a_0. En la figura 2.12 se muestra la relación entre estas tres energías e indica la energía mínima $E_{mín}$. En el mínimo de energía, la fuerza entre los iones es cero.

PROBLEMA DE EJEMPLO 2.10

Calcule la energía potencial neta de un par iónico sencillo Na^+Cl^- aplicando la ecuación:

$$E_{neta} = \frac{+Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 a} + \frac{b}{a^n}$$

y utilizando para b el valor obtenido de la fuerza de repulsión calculada para el par iónico Na^+Cl^- en el problema de ejemplo 2.8. Considere $n = 9$ para el NaCl.

Solución

a) Para determinar el valor de b para un par de iones NaCl se aplicará la ecuación:

$$F = -\frac{nb}{a^{n+1}} \tag{2.6}$$

El valor de la fuerza de repulsión entre un par de iones Na^+Cl^- obtenido del problema de ejemplo 2.8 es -3.02×10^{-9} N. Entonces,

$$-3.02 \times 10^{-9}\,\text{N} = \frac{-9b}{(2.76 \times 10^{-10}\,\text{m})^{10}}$$

$$b = 8.59 \times 10^{-106}\,\text{N} \cdot \text{m}^{10} \blacktriangleleft$$

b) Para calcular la energía potencial del par iónico Na^+Cl^-.

$$E_{Na^+Cl^-} = \frac{+Z_1Z_2e^2}{4\pi\epsilon_0 a} + \frac{b}{a^n}$$

$$= \frac{(+1)(-1)(1.60 \times 10^{-19}\,\text{C})^2}{4\pi[8.85 \times 10^{-12}\,\text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)](2.76 \times 10^{-10}\,\text{m})} + \frac{8.59 \times 10^{-106}\,\text{N} \cdot \text{m}^{10}}{(2.76 \times 10^{-10}\,\text{m})^9}$$

$$= -8.34 \times 10^{-19}\,\text{J}^* + 0.92 \times 10^{-19}\,\text{J}^*$$

$$= -7.42 \times 10^{-19}\,\text{J} \blacktriangleleft$$

*1 J = 1 N · m.

2.5.4 Disposición de los iones en los sólidos iónicos

Animación

Hasta ahora la exposición sobre el enlace iónico ha sido para un par de iones. Ahora se llevará al enlace iónico en los sólidos iónicos tridimensionales. Debido a que los iones elementales tienen aproximadamente una distribución de carga con simetría esférica, pueden considerarse esféricos con un radio característico. Los radios iónicos de algunos aniones y cationes elementales seleccionados se enlistan en la tabla 2.5. Como se estableció previamente, los cationes elementales son más pequeños que sus átomos y los aniones son más grandes. También, como en el caso de los átomos, los iones elementales, en general, aumentan de tamaño cuando lo hace su número cuántico principal (es decir, a medida que aumenta el número de capas electrónicas).

Tabla 2.5 Radios iónicos de elementos seleccionados

Iónico	Radio iónico (nm)	Ion	Radio iónico (nm)
Li^+	0.060	F^-	0.136
Na^+	0.095	Cl^-	0.181
K^+	0.133	Br^-	0.195
Rb^+	0.148	I^-	0.216
Cs^+	0.169		

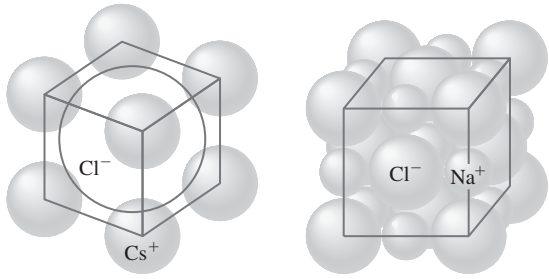


Figura 2.13
Arreglos del ordenamiento iónico en *a*) CsCl y *b*) NaCl. Ocho iones de Cl^- se pueden acomodar alrededor de Cs^+ pero sólo seis iones Cl^+ pueden acomodarse alrededor de un ion de Na^+.
(Según C.R. Barrett, W. D. Nix y A. S. Tetelman, "The Principles of Engineering Materials", Prentice-Hall, 1973, p. 27.)

Cuando los iones se acomodan juntos en un sólido, lo hacen sin una orientación preferente, ya que la atracción electrostática de cargas simétricas es independiente de la orientación de las cargas. De aquí que el enlace iónico sea de carácter *no direccional*. Sin embargo, el acomodamiento de los iones en un sólido iónico está gobernado por su posible disposición geométrica y la necesidad de mantener la neutralidad eléctrica del sólido.

Disposición geométrica de los iones en un sólido iónico Los cristales iónicos pueden tener estructuras muy complejas. A este respecto, sólo se considerará la *disposición geométrica* de los iones en dos estructuras iónicas sencillas: CsCl y NaCl. En el caso del CsCl, *ocho* iones Cl^- ($r = 0.181$ nm) se acomodan alrededor de un ion central Cs^+ ($r = 0.169$ nm), como se muestra en la figura 2.13*a*. Sin embargo, en el NaCl, sólo *seis* iones Cl^- ($r = 0.181$ nm) pueden acomodarse alrededor de un ion central Na^+ ($r = 0.095$ nm), como se muestra en la figura 2.13*b*. Para CsCl, la relación entre el radio del catión y el radio del anión es $0.169/0.181 = 0.934$, mientras que para el NaCl la relación es $0.095/0.181 = 0.525$. Por tanto, a medida que la relación radio de catión a radio de anión disminuye, menos aniones pueden rodear un catión central en este tipo de estructuras. Las estructuras cristalinas iónicas se expondrán con más detalle en el capítulo 10 sobre materiales cerámicos.

Neutralidad eléctrica de los sólidos iónicos Los iones en un sólido iónico deben acomodarse en una estructura de modo que se mantenga la neutralidad de la carga local. De aquí que en un sólido iónico como el CaF_2, el arreglo iónico se regirá en parte por el hecho de que tiene que haber dos iones fluoruro por cada ion calcio.

2.5.5 Energías de enlace de sólidos iónicos

Las energías reticulares y los puntos de fusión de los sólidos con enlace iónico son relativamente altos, como se indica en la tabla 2.6, que enumera dichos valores en

Tabla 2.6 Energías reticulares y puntos de fusión de sólidos iónicos seleccionados

Sólido iónico	Energía reticular*		Punto de fusión (°C)
	kcal/mol	kJ/mol	
LiCl	829	198	613
NaCl	766	183	801
KCl	686	164	776
RbCl	670	160	715
CsCl	649	155	646
MgO	3 932	940	2 800
CaO	3 583	846	2 580
SrO	3 311	791	2 430
BaO	3 127	747	1 923

* Todos los valores son negativos para la formación del enlace (se libera energía).

algunos sólidos escogidos. Cuando el tamaño del ion aumenta en un grupo de la tabla periódica, la energía reticular disminuye. Por ejemplo, la energía reticular del LiCl es 829 kJ/mol (198 kcal/mol), mientras que la del CsCl es sólo 649 kJ/mol (155 kcal/mol). La razón para esta disminución en la energía reticular es que los electrones de enlace en los iones más grandes están más lejos de la influencia atractiva de los núcleos positivos. Asimismo, electrones de enlace múltiple en un sólido iónico incrementan la energía reticular como por ejemplo el MgO, que tiene una energía reticular de 3 932 kJ/mol (940 kcal/mol).

2.6 ENLACE COVALENTE

Animación

Un segundo tipo de enlace atómico primario es el **enlace covalente**. Mientras el enlace iónico incluye átomos muy electropositivos y electronegativos, el enlace covalente se forma entre átomos con pequeñas diferencias de electronegatividad y ubicados muy próximos en la tabla periódica. En el enlace covalente, los átomos generalmente comparten sus electrones externos *s* y *p* con otros átomos, de modo que cada átomo alcanza la configuración electrónica de gas noble. En un enlace covalente sencillo, cada uno de los dos átomos contribuye con un electrón a la formación del par de electrones del enlace y las energías de los dos átomos asociadas con el enlace covalente decrecen (son más estables) como consecuencia de la interacción de los electrones. En el enlace covalente pueden formarse enlaces múltiples de pares de electrones por un átomo consigo mismo o con otros átomos.

2.6.1 Enlace covalente en la molécula de hidrógeno

El caso más sencillo de enlace covalente se da en la molécula de hidrógeno, en la cual dos átomos de hidrógeno aportan sus electrones $1s^1$ para formar un par de elec-

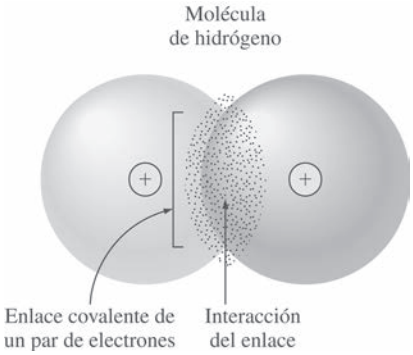


Figura 2.14
Enlace covalente en la molécula de hidrógeno. La densidad de carga más alta en la nube de electrones está en la región de traslape entre los núcleos de los átomos de hidrógeno.

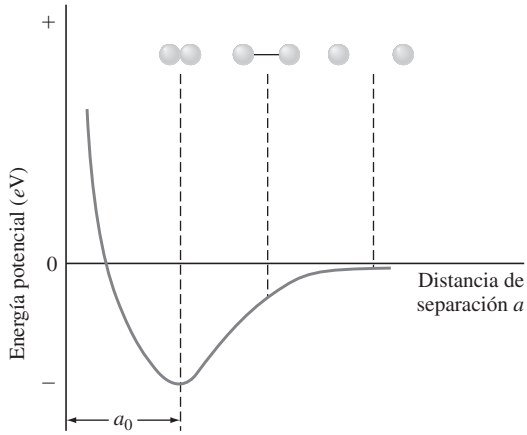
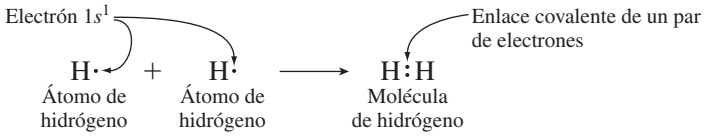


Figura 2.15
Energía potencial frente a distancia de separación entre dos átomos de hidrógeno. La distancia de equilibrio interátomico a_0 en la molécula de hidrógeno se da en el mínimo de energía potencial $E_{mín}$.

Animación

trones unidos por enlace covalente, como se indica mediante la notación punto-electrón:



Aunque esta notación punto-electrón es útil para representar el enlace covalente, no considera la distribución de la densidad de los electrones de valencia. En la figura 2.14 los dos átomos de hidrógeno se muestran formando un enlace covalente de un par de electrones con una alta densidad de la nube de carga electrónica entre los dos núcleos de los átomos de hidrógeno. A medida que los dos átomos de hidrógeno se aproximan para formar la molécula de hidrógeno, sus nubes de carga electrónica interaccionan y se traslapan creando una alta probabilidad de encontrar los electrones $1s^1$ de los átomos que se encuentran entre los dos núcleos de la molécula (figura 2.14). En el proceso de formación del enlace de la molécula de hidrógeno, la energía potencial de los átomos de hidrógeno disminuye, como se indica en la figura 2.15, y se libera energía. Para separar los átomos de hidrógeno de la molécula se necesitará energía, puesto que los átomos aislados estarían en un estado energético más alto.

2.6.2 Enlace covalente en otras moléculas diatómicas

También se forman pares de electrones de enlace covalente en otras moléculas diatómicas tales como F_2, O_2 y N_2. En estos casos los electrones p están compartidos entre los átomos. El átomo de flúor con sus siete electrones externos $(2s^2 2p^5)$ puede

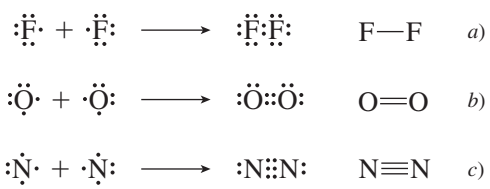


Figura 2.16
Enlace covalente en moléculas de *a*) flúor (enlace simple), *b*) oxígeno (enlace doble) y *c*) nitrógeno (enlace triple). El par electrónico de enlace covalente entre los átomos se muestra a la izquierda con notación de punto-electrón y a la derecha con notación de línea recta.

alcanzar la configuración electrónica de gas noble del neón cuando comparte un electrón $2p$ con otro átomo de flúor, como se muestra en la reacción con notación punto-electrón de la figura 2.16*a*. Análogamente, el átomo de oxígeno con sus seis electrones externos ($2s^2 2p^4$) puede alcanzar la configuración electrónica de gas noble ($2s^2 2p^6$) y compartir *dos* electrones $2p$ con otro átomo de oxígeno para formar la molécula diatómica O_2 (figura 2.16*b*). El nitrógeno con sus cinco electrones de valencia externos ($2s^2 2p^3$) también puede alcanzar la configuración electrónica de gas noble ($2s^2 2p^6$), compartiendo tres electrones $2p$ con otro átomo de nitrógeno para formar la molécula diatómica de nitrógeno (figura 2.16*c*).

Las reacciones químicas en las que participan enlaces covalentes se escriben algunas veces empleando la notación punto-electrón, como se muestra en la figura 2.16. Sin embargo, generalmente se emplea la notación con línea recta corta para representar los enlaces covalentes (figura 2.16). En el capítulo 10 sobre materiales poliméricos se encuentran ambos tipos de notaciones.

En la tabla 2.7 se presenta una lista de longitudes y energías de enlace aproximadas de determinados enlaces covalentes. Obsérvese que las energías de enlace más altas están asociadas con enlaces múltiples. Por ejemplo, el enlace C—C tiene una energía de 370 kJ/mol (88 kcal/mol), mientras que el enlace C═CC tiene una energía mucho mayor de 680 kJ/mol (162 kcal/mol).

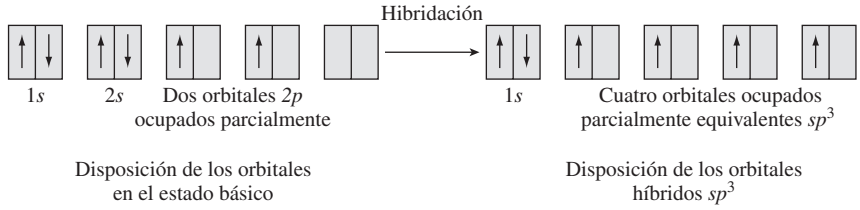
2.6.3 Enlace covalente en el carbono

En el estudio de materiales de ingeniería el carbono es muy importante, ya que es el elemento básico de la mayoría de materiales poliméricos. El átomo de carbono en el estado básico tiene una configuración electrónica $1s^2 2s^2 2p^2$. Este ordenamiento electrónico indica que el carbono debería formar *dos enlaces covalentes* con los dos orbitales $2p$ llenos a la mitad de su capacidad. Sin embargo, en muchos casos el carbono forma *cuatro enlaces covalentes* de igual fuerza. La explicación para estos cuatro enlaces covalentes la proporciona el concepto de *hibridación* del enlace, por la cual uno de los orbitales $2s$ es promovido a un orbital $2p$ de tal manera que se producen *cuatro* **orbitales híbridos** *equivalentes* sp^3, como se indica en el diagrama de orbitales de la figura 2.17. Aunque en el proceso de hibridación hace falta energía

Tabla 2.7 Energías y longitudes de enlaces covalentes seleccionados

Enlace	Energía de enlace*		Longitud de enlace (nm)
	kcal/mol	kJ/mol	
C—C	88	370	0.154
C═C	162	680	0.13
C≡C	213	890	0.12
C—H	104	435	0.11
C—N	73	305	0.15
C—O	86	360	0.14
C═O	128	535	0.12
C—F	108	450	0.14
C—Cl	81	340	0.18
O—H	119	500	0.10
O—O	52	220	0.15
O—Si	90	375	0.16
N—O	60	250	0.12
N—H	103	430	0.10
F—F	38	160	0.14
H—H	104	435	0.074

* Valores aproximados, puesto que la energía cambia con el entorno. Todos los valores son negativos para la formación de enlaces (la energía se libera). Fuente: L. H. Van Vlack, "Elements of Materials Science", 4a. ed., Addison-Wesley, 1980.



Animación

Figura 2.17
Hibridación de los orbitales de carbono para la formación de enlaces covalentes sencillos.

para promover el electrón 2*s* al estado 2*p*, la energía necesaria queda más que compensada por la disminución de energía que acompaña a la formación del enlace.

El carbono en la forma de diamante muestra el tipo de enlace covalente tetraédrico sp^3. Los cuatro orbitales híbridos sp^3 están dirigidos simétricamente hacia los vértices de un tetraedro regular, como se muestra en la figura 2.18. La estructura del diamante consta de una molécula compacta con enlace covalente tetraédrico sp^3, como se muestra en la figura 2.19. Esta estructura explica la dureza extremadamente alta del diamante, su alta fuerza de enlace y su alta temperatura de fusión. El diamante tiene una energía de enlace de 711 kJ/mol (170 kcal/mol) y una temperatura de fusión de 3 550°C.

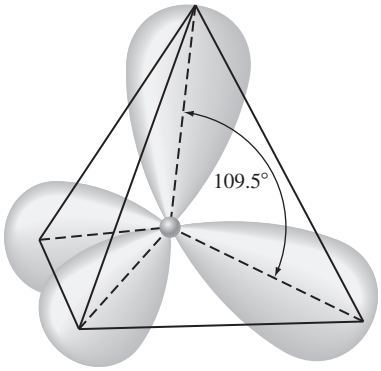


Figura 2.18
Un átomo de carbono con cuatro orbitales sp^3 equivalentes dirigidos simétricamente hacia los vértices de un tetraedro. El ángulo entre los orbitales es 109.5°.

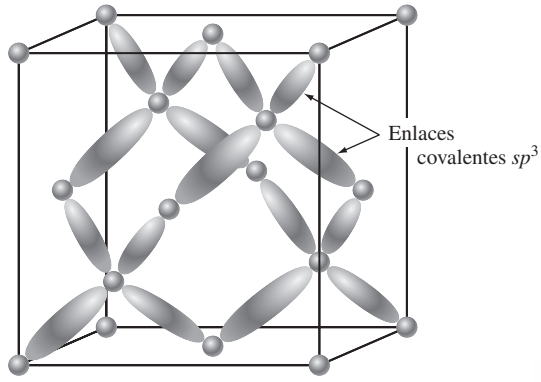


Figura 2.19
Enlaces covalentes sp^3 en la estructura del diamante. Cada zona sombreada representa un enlace covalente de un par de electrones.

Animación

2.6.4 Enlace covalente en moléculas que contienen carbono

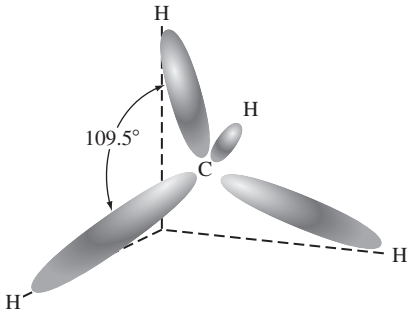
Las moléculas unidas en forma covalente que contienen sólo carbono e hidrógeno en su composición, se denominan *hidrocarburos*. El hidrocarburo más que simple es el metano, en el que el carbono forma cuatro enlaces covalentes sp^3 con átomos de hidrógeno, como se muestra en la figura 2.20. La energía de enlace intramolecular del metano es relativamente alta, 1 650 kJ/mol (396 kcal/mol), pero la energía de enlace intermolecular es muy baja, alrededor de 8 kJ/mol (2 kcal/mol). Así, las moléculas de metano están muy débilmente unidas y el punto de fusión resulta tan bajo como −183°C.

En la figura 2.21 se muestran fórmulas estructurales para metano, etano y butano (*n*-) normal, que son hidrocarburos sencillos unidos en forma covalente. A medida que la masa molecular de la molécula aumenta, también lo hacen su estabilidad y el punto de fusión.

El carbono también puede unirse consigo mismo para formar moléculas con enlaces dobles y triples, como se indica en fórmulas estructurales para el etileno y el acetileno de la figura 2.22. Los enlaces dobles y triples carbono-carbono son químicamente más reactivos que los enlaces sencillos carbono-carbono. Los enlaces múltiples carbono-carbono en moléculas que contienen carbono se denominan *enlaces insaturados*.

2.6.5 Benceno

Una estructura molecular importante para algunos materiales polimétricos es la estructura del benceno. La molécula de benceno tiene una composición química C_6H_6,



Animación

Figura 2.20
La molécula de metano CH_4 contiene cuatro enlaces covalentes sp^3. Cada región sombreada representa un par electrónico covalente.

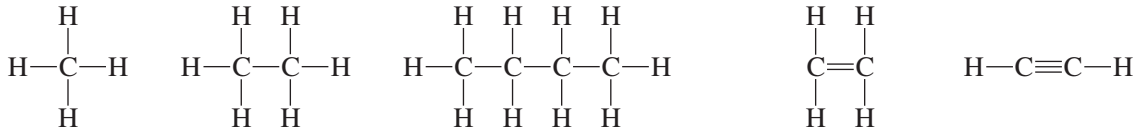


Figura 2.21
Fórmulas estructurales de hidrocarburos enlazados por enlaces covalentes sencillos. Nótese que a medida que aumenta la masa molecular, se eleva el punto de fusión.

Figura 2.22
Fórmulas estructurales de dos moléculas unidas covalentemente que tienen enlaces múltiples covalentes de carbono-carbono.

con los átomos de carbono formando un anillo hexagonal denominado en ocasiones *anillo bencénico* (figura 2.23). Los seis átomos de hidrógeno del benceno están unidos en forma covalente mediante enlaces sencillos a los seis átomos de carbono del anillo. Sin embargo, la estructura del enlace entre los átomos de carbono en el anillo es compleja. La manera más fácil de satisfacer la necesidad de cada átomo de carbono de tener cuatro enlaces covalentes es asignar alternadamente, enlaces sencillos y dobles a los átomos de carbono en el mismo anillo (figura 2.23*a*). Esta estructura puede representarse de manera más sencilla omitiendo los átomos de hidrógeno externos (figura 2.23*b*). Esta fórmula estructural para el benceno se empleará en este libro para indicar más claramente la estructura del enlace en el benceno.

No obstante, los datos experimentales indican que un doble enlace reactivo normal carbono-carbono, no existe en el benceno, y que los electrones de enlace dentro del anillo bencénico están deslocalizados y formando una estructura de enlace global intermedia en reactividad química entre la que exhiben los enlaces carbono-

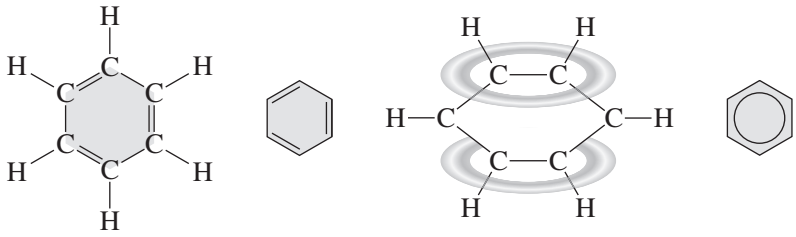


Figura 2.23
Representación de fórmulas estructurales para la molécula de benceno enlazada en forma covalente. *a*) Fórmula estructural usando la notación de enlace por línea-recta; *b*) Notación simplificada sin átomos de hidrógeno; *c*) Arreglos de enlaces que indican la deslocalización de las uniones carbono-carbono dentro del anillo de benceno. *(Según R. E. Davis, K.D. Gailey y K. W. Whitten, "Principles of Chemistry", Saunders College Publishing, 1984, p. 830.)* *d*) Notación simplificada indicando el enlace deslocalizado de los electrones dentro del anillo bencénico.

carbono sencillos y dobles (figura 2.23*c*). Así, la mayoría de los libros de química emplean un círculo inscrito en un hexágono para representar la estructura del benceno (figura 2.23*d*).

2.7 ENLACE METÁLICO

Un tercer tipo de enlace atómico primario es el **enlace metálico**, que se presenta en los metales sólidos. En los metales en estado sólido, los átomos están ordenados relativamente muy juntos en una ordenación sistemática o estructura cristalina. Por ejemplo, la disposición de los átomos de cobre en el cobre cristalino, se muestra en la figura 2.24*a*. En esta estructura los átomos están tan juntos que sus electrones externos de valencia son atraídos por los núcleos de sus numerosos vecinos. En el caso del cobre sólido cada átomo está rodeado por otros *12* átomos más próximos. Los electrones de valencia no están, por tanto, asociados férreamente a un núcleo particular, de manera que están dispersos entre los átomos en forma de una nube de carga electrónica de baja densidad, o "gas electrónico".

Los metales sólidos, por tanto, se consideran como constituidos por **núcleos de iones positivos** (átomos sin sus electrones de valencia) y por **electrones de valencia** dispersos en forma de nube electrónica que cubre una gran expansión de espacio (figura 2.24*b*). Los electrones de valencia están débilmente enlazados a los núcleos de iones positivos y pueden moverse fácilmente en el metal cristalino y por esto se les llama, frecuentemente, *electrones libres*.* Las altas conductividades térmica y eléc-

*Los electrones libres o deslocalizados pueden existir en algunos cristales que contienen principalmente enlaces covalentes o iónicos; por ejemplo, el grafito.

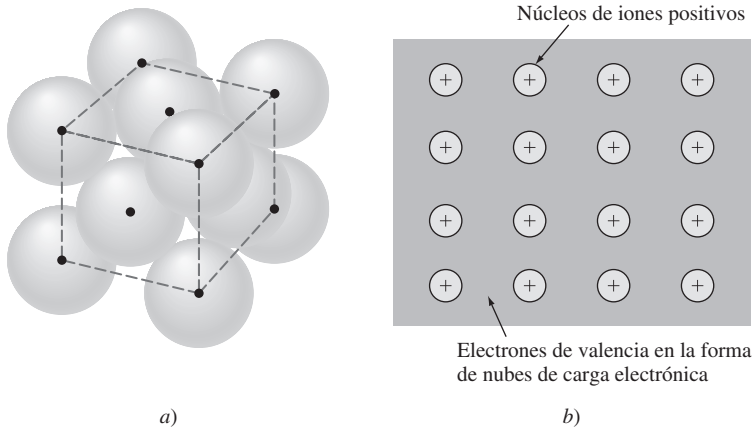


Figura 2.24
a) Disposición atómica en un cristal de cobre metálico. Cada átomo de cobre se coordina con otros 12 átomos de cobre y crea una estructura cristalina llamada *estructura cúbica centrada en las caras*. Los átomos se mantienen juntos por un "gas electrónico" de electrones de valencia deslocalizados y *b*) Diagrama esquemático bidimensional de átomos enlazados metálicamente. Los círculos con signos positivos en su interior representan núcleos de iones positivos y las nubes de carga en torno a los núcleos iónicos representan los electrones de valencia dispersos.

trica de los metales se basan en la teoría de que algunos electrones son libres para moverse a través de la celda cristalina del metal. La mayoría de los metales pueden deformarse considerablemente sin fracturas debido a que los átomos de metal se pueden deslizar unos sobre otros sin distorsionar totalmente la estructura de enlace metálico.

Los átomos en un enlace metálico sólido se mantienen juntos mediante este enlace para lograr un estado de más baja energía (o más estable). Para el enlace metálico *no hay restricciones* sobre pares electrónicos como en el enlace covalente, *ni restricciones sobre la neutralidad* de carga como en el enlace iónico. En el enlace metálico los electrones de valencia más externos de los átomos son compartidos por muchos átomos circundantes y de este modo, en general, el enlace metálico es *no direccional*.

Cuando los átomos metálicos se unen y comparten los electrones de valencia para formar un sólido cristalino, la energía total de los átomos por separado se ve reducida por el propio proceso de enlace. Como en los casos de enlace iónico y covalente, se logra un mínimo de energía entre un par de átomos cuando se alcanza la distancia de separación atómica de equilibrio, a_0, como se muestra en la figura 2.25. La magnitud de $E_0 - E_{\text{mín}}$ en la figura 2.25 es una medida de la energía de enlace entre los átomos de un metal en particular.

Los niveles de energía de los cristales metálicos multiatómicos difieren de los de los átomos individuales. Cuando los átomos metálicos se unen para formar un cristal metálico, sus energías decrecen, pero a niveles ligeramente diferentes. Por ello los

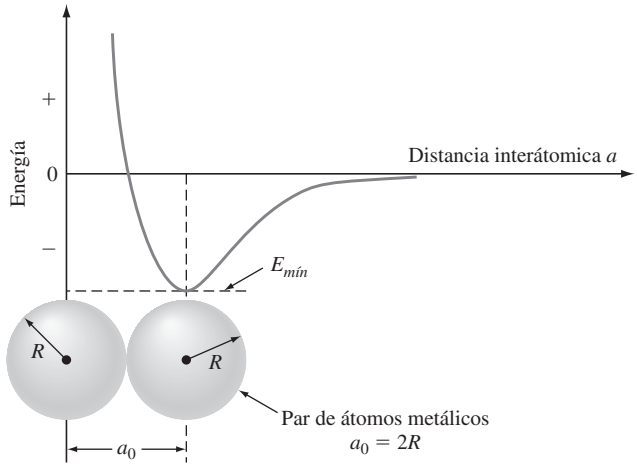


Figura 2.25
Energía en relación a la distancia de separación para un par de átomos metálicos. La distancia de separación atómica de equilibrio, a_0, se alcanza cuando la energía potencial neta es mínima.

electrones de valencia en un cristal metálico forman una "banda" de energía. La teoría de la banda de energía en los metales se trata más a fondo en la sección 6.2.

Las energías de enlace y los puntos de fusión de los diferentes metales varían mucho. En general, cuanto menor número de electrones de valencia por átomo intervenga en el enlace, más metálico resulta éste. Esto es, los electrones de valencia son más libres para moverse. El enlace metálico se da con mayor fuerza en los metales alcalinos, ya que con sólo deshacerse de un electrón de valencia alcanzan la configuración de gas noble. Por tanto, las energías de enlace y los puntos de fusión de los metales alcalinos son relativamente bajos. Por ejemplo, la energía de enlace del sodio es 108 kJ/mol (25.9 kcal/mol) y la del potasio es de 89.6 kJ/mol (21.4 kcal/mol). Los puntos de fusión del sodio (97.9°C) y del potasio (63.5°C) son también relativamente bajos.

Sin embargo, a medida que el número de electrones de enlace aumenta, las energías de enlace y los puntos de fusión de los metales también aumentan, como se indica en la tabla 2.8 para los metales del cuarto periodo. El calcio, con dos electrones de valencia por átomo, tiene sus electrones de enlace más estrechamente unidos que el potasio y, como resultado, la energía de enlace del calcio, que es de 177 kJ/mol (42.2 kcal/mol), y el punto de fusión (851°C) son ambos considerablemente más altos que los de potasio.

Con la introducción de los electrones 3*d* en los metales de transición del cuarto periodo, desde el escandio al níquel, las energías de enlace y los puntos de fusión de estos elementos se elevan incluso mucho más. Por ejemplo, el titanio tiene una energía de enlace de 473 kJ/mol (113 kcal/mol) y un punto de fusión de 1 660°C. El aumento de las energías de enlace y de los puntos de fusión de los metales de transición se atribuye al *enlace híbrido dsp* que supone una importante aportación de enlace covalente. El autor ha intentado cuantificar el efecto del enlace covalente

Tabla 2.8 Energía de enlace, puntos de fusión y configuraciones electrónicas de los metales del cuarto periodo de la tabla periódica

Elemento	Configuración electrónica	Energía de enlace		Punto de fusión (°C)
		kcal/mol	kJ/mol	
K	$4s^1$	89.6	21.4	63.5
Ca	$4s^2$	177	42.2	851
Sc	$3d^1 4s^2$	342	82	1 397
Ti	$3d^2 4s^2$	473	113	1 660
V	$3d^3 4s^2$	515	123	1 730
Cr	$3d^5 4s^1$	398	95	1 903
Mn	$3d^5 4s^2$	279	66.7	1 244
Fe	$3d^6 4s^2$	418	99.8	1 535
Co	$3d^7 4s^2$	383	91.4	1 490
Ni	$3d^8 4s^2$	423	101	1 455
Cu	$3d^{10} 4s^1$	339	81.1	1 083
Zn	$4s^2$	131	31.2	419
Ga	$4s^2 4p^1$	272	65	29.8
Ge	$4s^2 4p^2$	377	90	960

Tabla 2.9 Metalitividades-covalentes de algunos elementos sólidos*

												H				
Li 0.21	Be 1.47											B 2.7	C 4.0	N	O	F
Na 0.11	Mg 0.74											Al 0.75	Si	P	S	Cl
K 0.07	Ca 0.97	Sc 1.60	Ti 1.91	V 1.98	Cr 2.17	Mn 1.42	Fe 1.75	Co 1.70	Ni 1.66	Cu 1.24	Zn 0.48	Ga	Ge	As	Se	Br
Rb 0.05	Sr 0.88	Y 1.69	Zr 2.12	Nb 2.23	Mo 2.98	Tc	Ru 2.86	Rh 2.24	Pd 1.98	Ag 1.10	Cd 0.37	In 0.18	Sn 0.26	Sb	Te	I
Cs 0.03	Ba 0.97	La	Hf 2.55	Ta 3.40	W 3.86	Re 3.60	Os 3.09	Ir 2.79	Pt 2.02	Au 1.21	Hg	Tl 0.35	Pb 0.37	Bi	Po	At
Fr	Ra	Ac														

*Se elige el carbono como si estuviera enlazado completamente de manera covalente con un punto de fusión de 3 500°C y un valor C-M de 4.0.

sobre el enlace metálico de la mayoría de los metales asignándoles *metalitividades-covalentes* (valores C-M) a algunos de los elementos sólidos con base en sus temperaturas de fusión en °C en comparación al carbono (diamante), que tiene una temperatura de fusión de 3 500°C, y que se supone ser 100% de enlace covalente y una metalitividad-covalente de 4.0 (tabla 2.9). Por ejemplo, el porcentaje de enlace metálico en el hierro puro es 56.3% empleando el valor C-M para el hierro listado en la tabla 2.9, y como se demuestra en el problema de ejemplo 2.11.

PROBLEMA DE EJEMPLO 2.11

Calcule el porcentaje de enlace metálico y covalente en el hierro sólido, que tiene una temperatura de fusión de 1 535°C y una M-C de 1.75.

$$\%\text{ de enlace covalente} = \frac{1.75}{4.00} \times 100\% = 43.7\%$$

$$\%\text{ de enlace metálico} = 100\% - 43.7\% = 56.3\%$$

En estos cálculos se supone que únicamente están presentes el enlace metálico y el covalente en los enlaces químicos de los átomos de hierro.

Cuando los orbitales 3*d* y 4*s* están llenos, los electrones de las capas externas son atraídos más débilmente y las energías de enlace así como los puntos de fusión de los metales decrecen. Por ejemplo, el zinc, con una configuración electrónica $3d^{10}4s^2$, tiene una energía de enlace relativamente baja de 131 kJ/mol (31.2 kcal/mol) y una temperatura de fusión de 419°C.

2.8 ENLACES SECUNDARIOS

Hasta ahora se ha considerado solamente el enlace primario entre los átomos, y mostrado que éste depende de la interacción de los electrones de valencia. La fuerza que induce a formar el enlace atómico primario es la disminución de la energía de los electrones de enlace. Los enlaces secundarios son relativamente débiles en relación con los primarios y tienen energías de sólo entre 4 y 42 kJ/mol (1 a 10 kcal/mol). La fuerza motriz para la formación del enlace secundario es la atracción de los dipolos eléctricos contenidos en los átomos o en las moléculas.

Se crea un momento dipolar eléctrico al separar dos cargas iguales y opuestas, como se ve en la figura 2.26*a*. Los dipolos eléctricos se crean en los átomos o en las moléculas cuando existen centros con cargas positiva y negativa (figura 2.26*b*).

Los dipolos en los átomos o en las moléculas crean momentos dipolares. Un *momento dipolar* se define como el valor de la carga multiplicado por la distancia

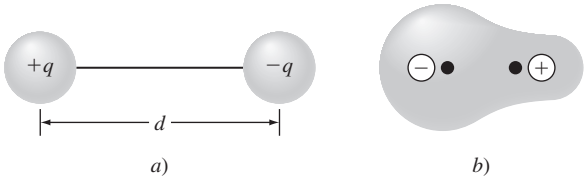


Figura 2.26
a) Dipolo eléctrico. El momento dipolar es *qd*.
b) Momento dipolar eléctrico en una molécula enlazada en forma covalente. Obsérvese la separación de los centros de carga positivos y negativos.

de separación entre las cargas positivas y negativas, o

$$\mu = qd \tag{2.9}$$

donde μ = Momento dipolar
q = Magnitud de la carga eléctrica
d = Distancia de separación entre los centros de carga

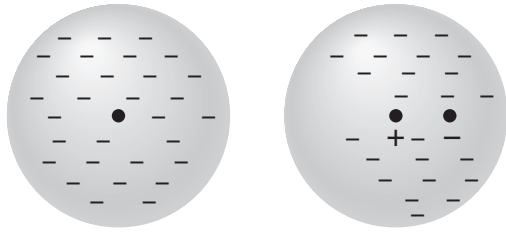
Los momentos dipolares en átomos y moléculas se miden en culombio-metro (C · m) o en unidades debye, donde un debye $= 3.34 \times 10^{-30}$ C · m.

Los momentos dipolares eléctricos interaccionan mediante fuerzas electrostáticas (culombianas) y, así los átomos y las moléculas que contienen dipolos se atraen unas a otras por estas fuerzas. Incluso, aunque las energías de enlace de los enlaces secundarios sean débiles, se vuelven importantes cuando son los únicos enlaces capaces de unir a los átomos o a las moléculas.

En general, existen dos tipos principales de enlaces secundarios entre átomos o moléculas que incluyen dipolos eléctricos: los dipolos variables y los dipolos permanentes. Colectivamente, a estos enlaces dipolares secundarios se les llama, algunas veces, *enlaces (fuerzas) de Van der Waals*.

2.8.1 Dipolos inducidos

Entre los átomos de un gas noble que tenga completa la capa electrónica más externa (s^2 en el He y s^2p^6 en Ne, Ar, Kr, Xe y Rn) se pueden presentar algunas fuerzas que formen enlaces secundarios muy débiles. Estas fuerzas de enlace aparecen debido a la distribución asimétrica de las cargas eléctricas en estos átomos, la cual crea dipolos eléctricos. En algún instante existe una alta probabilidad de que haya más carga electrónica en un extremo del átomo que en el otro (figura 2.27). Así, en un átomo en particular la nube de carga electrónica cambiará con el tiempo, creando



a) *b*)

Figura 2.27
Distribución de la nube de carga electrónica en un átomo de gas noble. *a*) Distribución ideal de una nube de carga electrónica simétrica y *b*) caso real con distribución de la nube de carga electrónica asimétrica y que cambia con el tiempo, creando un "dipolo eléctrico inducido".

Tabla 2.10 Puntos de fusión y ebullición de gases nobles a presión atmosférica

Gas noble	Punto de fusión (°C)	Punto de ebullición (°C)
Helio	−272.2	−268.9
Neón	−248.7	−245.9
Argón	−189.2	−185.7
Kriptón	−157.0	−152.9
Xenón	−112.0	−107.1
Radón	−71.0	−61.8

un "dipolo inducido". Los dipolos inducidos de los átomos cercanos se pueden atraer unos a otros y crear enlaces débiles no direccionales interatómicos. La licuefacción y solidificación de los gases nobles a bajas temperaturas y a altas presiones son debidas a las uniones entre los dipolos inducidos. Los puntos de fusión y ebullición de los gases nobles a presión atmosférica se presentan en la tabla 2.10. Nótese que a medida que el tamaño atómico de los gases nobles aumenta, los puntos de fusión y ebullición también aumentan debido a las fuerzas de enlace más fuertes como consecuencia de que los electrones tienen más libertad para crear momentos dipolares más fuertes.

2.8.2 Dipolos permanentes

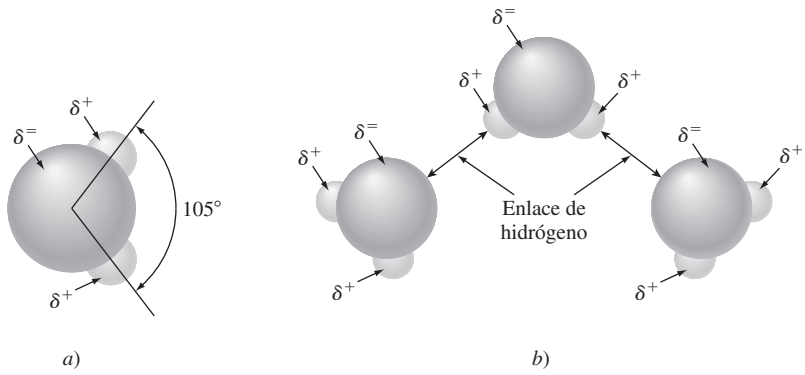
Es posible que lleguen a establecerse fuerzas de enlace débiles entre las moléculas unidas en forma covalente si las moléculas contienen **dipolos permanentes**. Por ejemplo, la molécula de metano, CH_4, con sus cuatro enlaces C—H dispuestos en una estructura tetraédrica (figura 2.20) no tiene momento dipolar debido a la disposición simétrica de los cuatro enlaces C—H. Es decir, la suma vectorial de sus cuatro momentos dipolares es cero. La molécula de clorometano, CH_3Cl, por el contrario, tiene disposición tetraédrica asimétrica de los tres enlaces C—H y del enlace C—Cl, originando un momento dipolar neto de 2.0 debyes. La sustitución de un átomo de hidrógeno por uno de cloro en el metano hace aumentar el punto de ebullición del metano de −128°C a −14°C para el clorometano. El punto de ebullición mucho más alto del clorometano se debe a las fuerzas de enlace del dipolo permanente entre las moléculas de clorometano. En la tabla 2.11 se muestran los momentos dipolares experimentales de algunos compuestos.

El **puente de hidrógeno** es un caso especial de una interacción dipolo-dipolo permanente entre moléculas polares. El enlace del hidrógeno se presenta cuando un enlace polar conteniendo el átomo de hidrógeno, O—H o N—H, interacciona con los átomos electronegativos O, N, F o Cl. Por ejemplo, la molécula de agua, H_2O, tiene un momento dipolar permanente de 1.84 debyes debido a su estructura asimétrica con sus dos átomos de hidrógeno y un ángulo de 105° con respecto a su átomo de oxígeno (figura 2.28*a*).

Las regiones atómicas del hidrógeno de la molécula de agua tienen centros cargados positivamente, y en el extremo opuesto, la región del átomo de oxígeno tiene un centro cargado negativamente (figura 2.28*a*). En el puente de hidrógeno entre las moléculas de agua, la región cargada negativamente de una molécula es atraída por fuerzas culombianas a la zona de carga positiva de otra molécula (figura 2.28*b*).

Tabla 2.11 Momentos dipolares experimentales de algunos compuestos (debyes)

H_2O	1.84	CH_3Cl	2.00
H_2	0.00	$CHCl_3$	1.10
CO_2	0.00	HCl	1.03
CCl_4	0.00	NH_3	1.46



a) *b*)

Figura 2.28
a) Dipolo permanente de la molécula de agua y *b*) enlace de hidrógeno entre moléculas de agua debido a la atracción polar de dipolo permanente.

En el agua líquida o sólida se forman, entre las moléculas de agua, fuerzas dipolo permanentes intermoleculares relativamente fuertes (enlace de hidrógeno). La energía asociada al puente de hidrógeno es casi 29 kJ/mol (7 kcal/mol), en contraste con las 2 a 8 kJ/mol (0.5 a 2 kcal/mol) para fuerzas dipolares de dipolo inducido en los gases nobles. El excepcional punto alto de ebullición del agua (100°C) para su masa molecular se atribuye al efecto del enlace de hidrógeno. El puente de hidrógeno resulta también muy importante para reforzar el enlace entre cadenas moleculares de algunos tipos de materiales poliméricos.

2.9 ENLACES MIXTOS

El enlace químico de átomos o iones puede suponer más de un tipo de enlace primario y también enlaces dipolares secundarios. Para el enlace primario existen las siguientes combinaciones de tipos de enlace mixto: 1) iónico-covalente; 2) metálico-covalente; 3) metálico-iónico, y 4) iónico-covalente-metálico.

2.9.1 Enlace mixto iónico-covalente

La mayoría de las moléculas con enlaces covalentes tienen algo de enlace iónico y viceversa. El carácter iónico parcial de los enlaces covalentes puede interpretarse con respecto a los términos de la escala de electronegatividad de la figura 2.9. Cuanto mayor es la diferencia en las electronegatividades de los elementos que intervienen en un enlace mixto iónico-covalente, mayor es el grado de carácter iónico del

enlace. Pauling[10] propuso la siguiente ecuación para determinar el porcentaje de carácter iónico de enlace en un compuesto AB:

$$\%\text{ de carácter iónico} = (1 - e^{(-1/4)(X_A - X_B)^2})(100\%) \qquad \textbf{(2.10)}$$

donde X_A y X_B son las electronegatividades de los átomos A y B en el compuesto.

Muchos compuestos semiconductores tienen enlace mixto iónico-covalente. Por ejemplo, GaAs es un compuesto 3-5 (Ga está en el grupo 3A y As en el grupo 5A de la tabla periódica) y ZnSe es un compuesto 2-6. El grado de carácter iónico en el enlace de esos compuestos crece a medida que lo hace la diferencia de electronegatividades entre los átomos en el compuesto. Por tanto, se podría esperar que un compuesto 2-6 tenga un mayor carácter iónico que un 3-5 debido a la mayor diferencia de electronegatividad en el compuesto 2-6. El problema de ejemplo 2.12 ilustra estos aspectos.

PROBLEMA DE EJEMPLO 2.12

Calcule el porcentaje de carácter iónico de los compuestos semiconductores GaAs (3-5) y ZnSe (2-6) empleando la ecuación de Pauling.

$$\%\text{ de carácter iónico} = (1 - e^{(-1/4)(X_A - X_B)^2})(100\%)$$

a) Para el GaAs, las electronegatividades tomadas de la figura 2.9 son $X_{Ga} = 1.8$ y $X_{As} = 2.2$. Por tanto,

$$\begin{aligned}\%\text{ de carácter iónico} &= (1 - e^{(-1/4)(1.8-2.2)^2})(100\%)\\ &= (1 - e^{(-1/4)(-0.4)^2})(100\%)\\ &= (1 - 0.96)(100\%) = 4\%\end{aligned}$$

b) Para el ZnSe, las electronegatividades de la figura 2.9 son $X_{Zn} = 1.7$ y $X_{Se} = 2.5$. Por tanto,

$$\begin{aligned}\%\text{ de carácter iónico} &= (1 - e^{(-1/4)(1.7-2.5)^2})(100\%)\\ &= (1 - e^{(-1/4)(-0.8)^2})(100\%)\\ &= (1 - 0.85)(100\%) = 15\%\end{aligned}$$

Obsérvese que como las electronegatividades difieren más para el compuesto 2-6, se incrementa el porcentaje de carácter iónico.

2.9.2 Enlace mixto metálico-covalente

Éste se presenta frecuentemente. Por ejemplo, los metales de transición tienen enlace metálico-covalente mixto que supone orbitales *dsp* (tabla 2.9). Los altos puntos de fusión de los metales de transición se atribuyen al enlace mixto metálico-covalente. También en el grupo 4A de la tabla periódica hay una transición gradual desde el enlace covalente puro en el carbono (diamante) a algún carácter metálico en el silicio y germanio. El estaño y el plomo tienen un enlace primordialmente metálico.

[10] Linus Carl Pauling (1901-1994). Químico estadounidense pionero en el estudio del enlace químico y cuyo trabajo condujo a su mejor entendimiento. Recibió el Premio Nobel de Química en 1954.

2.9.3 Enlace mixto metálico-iónico

Si se da una diferencia significativa de electronegatividad en los elementos que forman un compuesto intermetálico, podría existir una cantidad considerable de transferencia de electrones (enlace iónico) en el compuesto. Por tanto, algunos compuestos intermetálicos son buenos ejemplos de enlace mixto metálico-iónico. La transferencia de electrones es especialmente importante para los compuestos intermetálicos tales como el $NaZn_{13}$ y menos importantes para compuestos como el Al_9Co_3 y Fe_5Zn_{21} debido a que las diferencias de electronegatividades para estos dos últimos compuestos son mucho menores.

2.10 R E S U M E N

Los átomos constan principalmente de tres partículas subatómicas clásicas: *protones, neutrones* y *electrones.* Los electrones se han representado formando parte de una nube electrónica de densidad variable alrededor de un núcleo atómico más denso que contiene la mayor parte de la masa del átomo. Los electrones externos (electrones de alta energía) son los electrones de valencia y su comportamiento determina la reactividad química de cada átomo.

Los electrones obedecen las leyes de la mecánica cuántica y como resultado las energías de los electrones están *cuantizadas*. Esto es, un electrón puede tener sólo ciertos valores de energía permitidos. Si un electrón cambia su energía, debe cambiarse a un nivel energético permitido. Durante un cambio energético, un electrón emite o absorbe un fotón de energía de acuerdo con la ecuación de $\Delta E = h\nu$, donde ν es la frecuencia de la radiación. Cada electrón está asociado a cuatro números cuánticos: el número cuántico principal n, el número cuántico secundario l, el número cuántico magnético m_l y el número cuántico de giro m_s. De acuerdo con el principio de exclusión de Pauli, *dos electrones no pueden tener nunca los cuatro números cuánticos iguales*. Los electrones también obedecen el principio de incertidumbre o indeterminación de Heisenberg, que establece que es imposible determinar simultáneamente el momento y la posición de un electrón. Así pues, la localización de los electrones en los átomos debe considerarse en términos de la distribución de las densidades electrónicas.

Existen dos tipos principales de enlaces atómicos: 1) *enlaces primarios fuertes* y 2) *enlaces secundarios débiles*. Los enlaces primarios se subdividen en: 1) *iónicos*; 2) *covalentes* y 3) *metálicos*; y los secundarios se pueden dividir en: 1) *dipolos inducido*s y 2) *dipolos permanentes*.

Los *enlaces iónicos* se forman mediante la transferencia de uno o más electrones de un átomo electropositivo a otro electronegativo. Los iones se mantienen unidos formando un sólido cristalino, mediante fuerzas electrostáticas (culombianas) *no direccionales*. El tamaño de los iones (factor geométrico) y la neutralidad eléctrica son los dos factores importantes que determinan la disposición del acomodamiento iónico. Una característica de los *enlaces covalentes* es que comparten pares de electrones en orbitales ocupados parcialmente. Cuanto más se traslapan los orbitales de enlace, más fuerte es la unión. Los enlaces covalentes son *direccionales*. Los *enlaces metálicos* están formados por átomos metálicos, que comparten en común sus electrones de valencia en forma de nubes de carga electrónica deslocalizada. En general, cuanto menor es el número de los electrones de valencia, más deslocalizados están y más metálico es el enlace. El *enlace metálico* sólo se presenta entre un agregado de átomos y es *no direccional*.

Los *enlaces secundarios* se forman por la atracción electrostática de los dipolos eléctricos dentro de los átomos o moléculas. Los *dipolos inducidos* unen a los átomos debi-

do a una distribución asimétrica de la carga dentro de los mismos. Estas fuerzas de enlace son importantes para la licuefacción y solidificación de los gases nobles. Los *enlaces de dipoloinducidos* son importantes en el enlace de moléculas polares unidas en forma covalente, tales como el agua y los hidrocarburos.

El *enlace mixto* suele presentarse entre átomos y en moléculas. Por ejemplo, metales tales como el titanio o el hierro tienen enlaces mixtos metálico-covalentes. Los compuestos unidos en forma covalente tales como GaAs y ZnSe tienen cierta cantidad de carácter iónico. Algunos compuestos intermetálicos tales como el $NaZn_{13}$ tienen una parte de carácter iónico mezclado con una parte de carácter metálico. En general, el enlace tiene lugar entre átomos o moléculas debido a la disminución de energía que se produce cuando se origina el proceso de enlace.

2.11 DEFINICIONES

Sección 2.1

Átomo: unidad básica de un elemento, que puede experimentar un cambio químico.

Sección 2.2

Número atómico: número de protones en el núcleo de un átomo de un elemento.

Unidad de masa cuántica (u): unidad de masa basada en la masa exacta de la doceava parte del ${}^{12}_{6}C$.

Número de Avogadro: 6.023×10^{23} átomos/mol: número de átomos en un mol-gramo relativo o mol de un elemento.

Sección 2.3

Mecánica cuántica: rama de la física en la que los sistemas en investigación pueden tener sólo valores permitidos definidos de energía separados por regiones prohibidas.

Estado básico: el estado cuántico de más baja energía.

Fotón: partícula de radiación con una frecuencia y longitud de onda asociadas. También se le denomina *cuanto* de radiación.

Energía de ionización: energía que es necesaria para llevar un electrón desde su estado básico hasta el infinito.

Principio de incertidumbre de Heisenberg: establece que es imposible determinar con precisión y a la vez la posición y el momento de una pequeña partícula como un electrón.

Números cuánticos: el conjunto de cuatro números necesarios para identificar cada electrón en un átomo. Éstos son el número cuántico principal n, el número cuántico secundario l, el número cuántico magnético m_l y el número cuántico de giro m_s.

Orbital atómico: región en el espacio cercano al núcleo de un átomo, en el cual se encuentra situado un electrón con un juego de números cuánticos. Un orbital atómico está asociado también a un cierto nivel de energía.

Principio de exclusión de Pauli: establece que dos electrones no pueden tener los cuatro números cuánticos iguales.

Capa de electrones: grupo de electrones con el mismo número cuántico n.

Configuración electrónica: distribución de todos los electrones en un átomo de acuerdo con sus orbitales atómicos.

Anión: ion con una carga negativa.

Catión: ion con carga positiva.

Sección 2.5

Enlace iónico: enlace primario resultante de la atracción electrostática entre iones con carga opuesta. Es un enlace no direccional. Un ejemplo de material con enlace iónico es el cristal de NaCl.

Sección 2.6

Enlace covalente: enlace primario que se produce cuando se comparten electrones. En la mayoría de los casos el enlace covalente incluye la sobreposición de orbitales de dos átomos ocupados parcialmente. Es un enlace direccional. Un ejemplo de material con enlaces covalentes es el diamante.

Orbital híbrido: orbital atómico obtenido cuando dos o más orbitales equivalentes se combinan. Este proceso de recombinación de los orbitales se llama *hibridación*.

Sección 2.7

Electrones de valencia: electrones de las capas más extremas que intervienen en el enlace.

Núcleo ion-positivo: un átomo sin sus electrones de valencia.

Enlace metálico: enlace primario que se produce por la agregación de átomos metálicos y cuando se comparten electrones externos deslocalizados en forma de nube de carga electrónica por agregación de átomos metálicos. Es un enlace no direccional. Un ejemplo de material con enlace metálico es el sodio elemental.

Sección 2.8

Enlace de dipolo permanentemente: enlace secundario que se origina por la atracción de moléculas con dipolos permanentes, esto es, cada molécula tiene centros de carga positiva y negativa separados una cierta distancia.

Puente de hidrógeno: tipo especial de atracción dipolar permanente intermolecular, que se presenta entre átomo de hidrógeno enlazado a un elemento muy electronegativo (F, O, N o Cl) y a otro átomo de un elemento muy electronegativo.

2.12 PROBLEMAS

Las respuestas a los problemas marcados con un asterisco se encuentran al final del libro.

2.1 ¿Cuál es la masa en gramos de *a*) un protón; *b*) un neutrón y *c*) un electrón?

2.2 ¿Cuál es la carga eléctrica en culombios de *a*) un protón; *b*) un neutrón y *c*) un electrón?

2.3 Defina: *a*) número atómico; *b*) unidad de masa atómica; *c*) número de Avogadro y *d*) masa de un átomo relativa.

2.4 ¿Cuál es la masa en gramos de un átomo de oro?

2.5 ¿Cuántos átomos hay en un gramo de oro?

***2.6** Un alambre de oro tiene 0.70 mm de diámetro y 8.0 cm de largo. ¿Cuántos átomos contiene? La densidad del oro es 19.3 g/cm^3.

2.7 ¿Cuál es la masa en gramos de un átomo de molibdeno?

***2.8** ¿Cuántos átomos hay en un gramo de molibdeno?

***2.9** Una soldadura contiene 52% en peso de estaño y 48% en peso de plomo. ¿Cuáles son los porcentajes atómicos de estaño y plomo en la soldadura?

2.10 Una aleación de nonel está formada por 70% en peso de níquel y 30% en peso de cobre. ¿Cuáles son los porcentajes atómicos de Ni y Cu en esta aleación?

2.11 Una aleación de cuproníquel está formada por 80% en peso de Cu y 20% en peso de Ni. ¿Cuáles son los porcentajes atómicos de Cu y Ni en la aleación?

***2.12** ¿Cuál es la fórmula química de un compuesto intermetálico que contiene 49.18% de Cu y 50.82% de Au?

2.13 ¿Cuál es la fórmula química de un compuesto intermetálico con 15.68% en peso de Mg y 84.32% en peso de Al?

2.14 Defina qué es un fotón.

***2.15** Calcule la energía en julios y electrón-voltios de un fotón cuya longitud de onda es 303.4 nm.

2.16 Calcule la energía en julios y electrón-voltios de un fotón cuya longitud de onda es 226.4 nm.

***2.17** Un átomo de hidrógeno tiene un electrón en el estado $n = 4$. El electrón baja al estado $n = 3$. Calcule *a*) la energía del fotón emitido; *b*) su frecuencia y *c*) su longitud de onda en nanómetros (nm).

2.18 Un átomo de hidrógeno tiene un electrón en el nivel $n = 6$. El electrón baja a un estado $n = 2$. Calcule *a*) la energía del fotón emitido; *b*) su frecuencia y *c*) su longitud de onda en nm.

***2.19** En un generador comercial de rayos X, metales estables tales como cobre (Cu) o volframio (W) se encuentran expuestos a un haz de electrones de alta energía. Estos electrones originan un proceso de ionización en los átomos del metal. Cuando los átomos del metal regresan a su estado básico emiten rayos X de energía y longitud de onda características. Por ejemplo, un átomo de tungsteno que sufre el impacto de un haz de electrones de alta energía puede perder uno de sus electrones de la capa K. Cuando esto sucede, otro electrón probablemente de la capa L del tungsteno "cae" en el sitio vacante de la capa K. Si tal transición $2p \rightarrow 1s$ ocurre en el tungsteno, se emite un rayo X, W K_α. Un rayo X, K_α del tungsteno, tiene una longitud de onda λ de 0.02138 nm. ¿Cuál es su energía? ¿Cuál es su frecuencia?

2.20 La mayoría de los modernos *microscopios electrónicos de barrido* (SEM) están equipados con detectores de energía dispersiva de rayos X que facilitan el análisis químico de la muestra. Este análisis por rayos X es una extensión natural de la capacidad del SEM debido a los electrones que se emplean para formar la imagen y que son también capaces de crear rayos X característicos de la muestra. Cuando un haz de electrones incide sobre la muestra, se generan rayos X específicos de los elementos de la misma. Éstos pueden detectarse y emplearse para deducir la composición de la muestra a partir de las longitudes de onda bien conocidas de los rayos X característicos de los elementos. Por ejemplo:

Elemento	Longitud de onda de rayos X K_α
Cr	0.2291 nm
Mn	0.2103 nm
Fe	0.1937 nm
Co	0.1790 nm
Ni	0.1659 nm
Cu	0.1542 nm
Zn	0.1436 nm

Supóngase que se analiza una aleación metálica en un SEM y se detectan tres diferentes energías de rayos X. Si las tres energías son 7 492; 5 426 y 6 417 eV, ¿qué elementos se encuentran presentes en la muestra?¿Cómo se podría llamar a tal aleación? (Consulte el capítulo 9.)

2.21 Describa el modelo de Bohr del átomo del hidrógeno. ¿Cuáles son las deficiencias más importantes de este modelo?

2.22 ¿Cuál es la energía de ionización, en electrón-voltios, del electrón del hidrógeno en su estado básico?

2.23 Describa los cuatro números cuánticos de un electrón y dé sus valores permitidos.

2.24 Escriba la configuración electrónica de los siguientes elementos; emplee la notación *spdf*: *a*) itrio; *b*) hafnio; *c*) samario y *d*) renio.

2.25 ¿Cuál es la configuración electrónica más externa para todos los gases nobles excepto el helio?

2.26 De los gases nobles Ne, Ar, Kr y Xe, ¿cuál debería ser el más reactivo químicamente?

2.27 Defina el término *electronegatividad*.

2.28 ¿Cuáles cinco elementos son los más electropositivos de acuerdo con la escala de electronegatividad?

2.29 ¿Cuáles cinco elementos son los más electronegativos de acuerdo con la escala de electronegatividad?

2.30 Escriba la configuración electrónica de los siguientes iones empleando la notación *spdf*: *a*) Cr^{2+}, Cr^{3+}, Cr^{6+}; *b*) *Mo^{3+}, Mo^{4+}, Mo^{6+} y *c*) Se^{4+}, Se^{6+}, Se^{2-}.

2.31 Describa brevemente los siguientes tipos de enlace primario: *a*) iónico; *b*) covalente y *c*) metálico.

2.32 Describa brevemente los siguientes tipos de enlace secundario: *a*) dipolo inducido, y *b*) dipolo permanente.

2.33 En general, ¿por qué se produce un el enlace entre los átomos?

2.34 Describa el proceso de enlace iónico entre el par de átomos, sodio y cloro. ¿Qué electrones intervienen en el proceso de enlace?

2.35 Después de la ionización, ¿por qué el ion sodio es más pequeño que el átomo de sodio?

2.36 Después de la ionización, ¿por qué el ion cloruro es más grande que el átomo de cloro?

2.37 Calcule la fuerza de atracción (●► ◄●) entre el par de iones K^+ y Br^- que apenas se tocan. Suponga que el radio iónico del K^+ es 0.133 nm y el Br^- es 0.196 nm.

***2.38** Calcule la fuerza de atracción (●► ◄●) entre el par de iones Ba^{2+} y S^{2-} que apenas se tocan. Considere que el radio iónico del Ba^{2+} es 0.143 nm y el del S^{2-} es 0.174 nm.

***2.39** Calcule la energía potencial neta para el par K^+Br^- empleando la constante *b* calculada en el problema 2.37. Suponga $n = 9.5$.

2.40 Calcule la energía potencial neta para el ion par $Ba^{2+}S^{2-}$ empleando la constante *b* calculada en el problema 2.38. Suponga $n = 10.5$.

2.41 Si la fuerza atractiva entre el par de iones Cs^+ y I^- es 2.83×10^{-9} N y el radio iónico del Cs^+ es 0.165 nm, calcule el radio iónico de ion I^- en nanómetros.

***2.42** Si la fuerza atractiva entre el par de iones Sr^{2+} y O^{2-} es 1.29×10^{-8} N y el radio iónico del ion O^{2-} es 0.132 nm, calcule el radio iónico del Sr^{2+} en nanómetros.

2.43 Describa los dos factores principales que pueden tenerse en cuenta en el ordenamiento de los de iones en un cristal iónico.

2.44 Describa el proceso para la formación de un enlace covalente entre un par de átomos de hidrógeno. ¿Cuál es la energía determinante en la formación de una molécula diatómica?

2.45 Describa la disposición electrónica por enlace covalente en las siguientes moléculas diatómicas: *a*) flúor; *b*) oxígeno y *c*) nitrógeno.

2.46 Describa el proceso de hibridación para la formación de cuatro orbitales híbridos sp^3 equivalentes en el carbono durante el enlace covalente. Utilice diagramas de orbitales.

2.47 Especifique qué átomos enlazados a un átomo de C exhiben hibridaciones sp^3, sp^2 y *sp*. Para cada una, dé la disposición geométrica de los átomos en la molécula.

2.48 ¿Por qué es el diamante un material tan duro?

2.49 Describa el proceso de la formación del enlace metálico entre un agregado de átomos de cobre.

2.50 ¿Cómo pueden explicarse las altas conductividades eléctricas y térmicas de metales por el modelo del "gas electrónico" del enlace metálico?, ¿Y la ductilidad?

2.51 El punto de fusión del potasio metálico es 63.5°C, mientras que el del titanio es 1 660°C. ¿Qué explicación puede darse para esta notable diferencia en las temperaturas de fusión?

2.52 ¿Existe correlación entre las configuraciones electrónicas de los elementos desde el potasio ($Z = 19$) hasta el cobre ($Z = 29$) y sus respectivos puntos de fusión? (Véanse las tablas 2.8 y 2.9.)

***2.53** Empleando los valores de la tabla 2.9 de metalitividad-covalente, calcule valores para porcentaje de enlace covalente y de enlace metálico en el titanio metálico.

2.54 Empleando los valores de la tabla 2.9 de metalitividad-covalente, calcule los valores para el porcentaje de enlace covalente y de enlace metálico en el tungsteno metálico.

2.55 Defina momento dipolar eléctrico.

2.56 Describa el enlace por dipolo inducido que existe entre los átomos del gas noble neón. Entre los gases nobles kriptón y xenón, ¿cuál cabría esperar que tenga el enlace dipolar más fuerte y por qué?

2.57 Describa el enlace por dipolo permanente entre moléculas covalentes polares.

2.58 El tetracloruro de carbono (CCl_4) tiene un momento dipolar nulo. ¿Qué puede decir sobre la disposición del enlace C—Cl en esta molécula?

2.59 Describa el enlace de hidrógeno. ¿Entre qué elementos está restringido este enlace?

2.60 Describa el puente de hidrógeno entre las moléculas del agua.

2.61 El metano (CH_4) tiene una temperatura de ebullición más baja que la del agua (H_2O). Explique por qué ocurre esto, con respecto al enlace entre moléculas, en cada una de estas dos sustancias.

2.62 Esboce un tetraedro y haga un pequeño modelo de cartón y cinta de 2 pulgadas de lado. Haga lo mismo para un octaedro.

2.63 ¿Cuál es la ecuación de Pauling para determinar el porcentaje de carácter iónico en un compuesto con enlace mixto iónico-covalente?

***2.64** Compare el porcentaje de carácter iónico de los compuestos semiconductores CdTe e InP.

2.65 Compara el porcentaje de carácter iónico en los compuestos semiconductores InSb y ZnTe.

2.66 Para cada uno de los siguientes compuestos, establezca si el enlace es esencialmente metálico, covalente, iónico, Van der Waals o de puente de hidrógeno: *a*) Ni; *b*) ZrO_2; *c*) grafito; *d*) Kr sólido; *e*) Si; *f*) BN; *g*) SiC; *h*) Fe_2O_3; *i*) MgO; *j*) W; *k*) H_2O, dentro de las moléculas, y *l*) H_2O, entre las moléculas.

Si los enlaces iónico y covalente están implicados en el enlace de cualquiera de los compuestos antes citados, calcule el porcentaje de carácter iónico en cada compuesto.

2.13 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. Los cartuchos de latón se fabrican con una aleación de 70% en peso de cobre y 30% en peso de zinc. Exponga la naturaleza de los enlaces entre el cobre y el zinc en esta aleación.

2. El aluminio puro es un metal dúctil con baja resistencia a la tensión y poca dureza. Su óxido Al_2O_3 (alúmina) es extremadamente fuerte, duro y frágil. ¿Puede explicar la diferencia existente desde el punto de vista de los enlaces atómicos?

3. El grafito y el diamante están constituidos por átomos de carbono. *a*) Especifique algunas características de cada uno; *b*) dé una aplicación para el grafito y otra para el diamante y *c*) si ambos materiales están constituidos de carbono, ¿por qué tienen propiedades tan diferentes?

4. El silicio es ampliamente empleado en la manufactura de dispositivos para circuitos integrados para transistores y diodos emisores de luz. A menudo es preciso aplicar una delgada capa de óxido (SiO_2) en las obleas de silicio. *a*) ¿Qué diferencias existen entre las propiedades del sustrato de silicio y de la capa de óxido?; *b*) diseñe un proceso que sintetice la capa de óxido sobre la oblea de silicio y *c*) diseñe un proceso que forme la capa de óxido solamente en ciertas áreas deseadas.

5. En la manufactura de una bombilla se procede a sacar el aire y se llena con gas argón. ¿Cuál es el propósito?

6. El acero inoxidable es una aleación resistente a la corrosión debido a que contiene grandes cantidades de cromo. ¿Cómo protege el cromo al metal de la corrosión?

7. Los robots se emplean en las industrias de automoción para soldar dos componentes en sitios específicos. Evidentemente, la posición final del brazo debe determinarse con precisión para soldar los componentes en la posición necesaria. *a*) En la selección del material del brazo del robot, ¿qué factores deben considerarse? y *b*) seleccione un material adecuado para esa aplicación.

8. *a*) Explique por qué el contacto entre un metal duro y otro blando no es adecuado para aplicaciones donde sea importante la "resistencia a la abrasión"; *b*) ¿cómo protegería una herramienta de acero de corte de su deterioro prematuro? y *c*) diseñe un proceso para solucionar el problema.

9. Una determinada aplicación necesita un material que debe ser muy duro y resistente a la corrosión a temperatura y atmósfera ambientales. Sería benéfico, aunque no

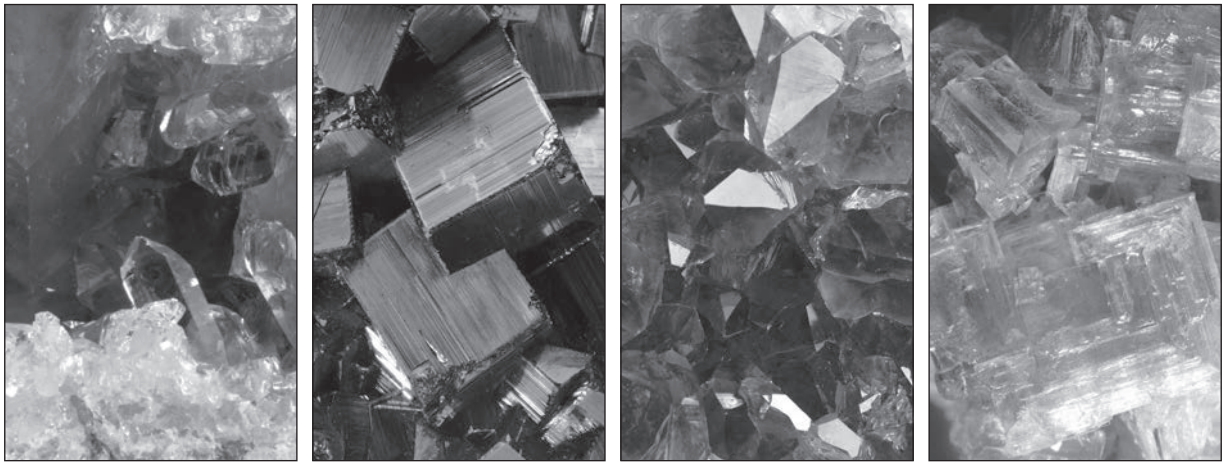
necesariamente, que el material fuera también resistente al impacto. *a*) Si usted sólo considera las características principales, ¿qué clase de materiales investigaría para su selección?; *b*) si usted considera todo tipo de características ¿qué clase de materiales investigaría? y *c*) sugiera un material.

10. Determinada aplicación demanda un material que sea ligero en peso, aislante eléctrico y algo flexible. *a*) ¿Qué clase de materiales investigaría para su selección? y *b*) explique su respuesta desde el punto de vista de los enlaces presentes.

11. Determinada aplicación demanda un material que sea no conductor (aislante eléctrico), extremadamente rígido y ligero. *a*) ¿Qué clase de materiales investigaría para su selección? y *b*) explique su respuesta desde el punto de vista de los enlaces presentes.

CAPÍTULO

3 Estructuras cristalinas y amorfas en los materiales



a) *b*) *c*) *d*)

(© Paul Silverman/Fundamental Photographs)

Los sólidos pueden clasificarse en dos amplias categorías: cristalinos y amorfos. Los sólidos cristalinos, debido a la estructura ordenada de sus átomos, moléculas o iones tienen formas bien definidas. Los metales son cristalinos y están compuestos por cristales o granos bien definidos. Los granos son pequeños y no son observables claramente dada la naturaleza opaca de los metales. En los minerales, principalmente de naturaleza translúcida a transparente, las formas cristalinas bien definidas se pueden observar con claridad. Las siguientes imágenes muestran la naturaleza cristalina de los minerales como *a*) celestita ($SrSO_4$) de color azul celeste, *b*) pirita (FeS_2), también llamada el "oro de los tontos" por su color amarillo dorado, *c*) amatista (SiO_2), una variedad púrpura del cuarzo y *d*) halita (NaCl), mejor conocida como sal de roca. En contraste, los sólidos amorfos presentan un orden pobre o de corto alcance y no se identifican ni con la simetría ni la regularidad de los sólidos cristalinos. ■

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Describir a los materiales cristalinos y no cristalinos (amorfos).
2. Conocer la disposición de los átomos y iones de los sólidos en el espacio e identificar los principales bloques componentes de los sólidos.
3. Describir la diferencia entre estructura atómica y estructura cristalina para los materiales sólidos.
4. Distinguir la estructura cristalina del sistema cristalino.
5. Explicar por qué los plásticos no pueden tener una estructura 100% cristalina.
6. Explicar el polimorfismo y la alotropía en materiales.
7. Calcular las densidades de los metales que tienen estructuras cúbicas centradas en el cuerpo y en las caras.
8. Describir cómo aplicar el método de difracción de los rayos X para la caracterización de los materiales.
9. Escribir la nomenclatura para la posición de los átomos, índices de dirección e índices de Miller para los cristales cúbicos; especificar las tres estructuras densamente empaquetadas para la mayoría de los metales; determinar los índices de Miller-Bravais para la estructura empaquetada hexagonal cerrada, y trazar direcciones y planos en los cristales cúbicos y hexagonales.

3.1 LAS REDES ESPACIALES Y LA CELDA UNITARIA

Animación
Tutorial

La estructura física de los materiales sólidos de importancia en ingeniería depende principalmente del ordenamiento de los átomos, iones o moléculas que constituyen el sólido, y de las fuerzas de enlace entre ellos. Si los átomos o iones de un sólido están ordenados de acuerdo con un patrón que se repite en el espacio, forman un sólido que tiene un *orden de largo alcance* (OLA) al cual se le llama *sólido cristalino* o *material cristalino*. Ejemplos de materiales cristalinos son los metales, las aleaciones y algunos materiales cerámicos. Contrastando con los materiales cristalinos, existen algunos materiales cuyos átomos o iones no están ordenados en forma de largo alcance, periódica y repetible, y poseen únicamente un *orden de corto alcance* (OCA). Esto significa que el orden existe únicamente en la vecindad inmediata de un átomo o molécula. Como ejemplo tenemos al agua líquida que tiene en sus moléculas un orden de corto alcance y en la que un átomo de oxígeno se encuentra unido de forma covalente a dos átomos de hidrógeno. Sin embargo, este orden desaparece en la medida en que cada molécula se une a otras moléculas en forma aleatoria a través de enlaces secundarios débiles. Los materiales que presentan solamente un orden de corto alcance se clasifican como *amorfos* (sin forma) o no cristalinos. En la sección 3.12 se da una definición más detallada de los materiales cristalinos junto con algunos ejemplos.

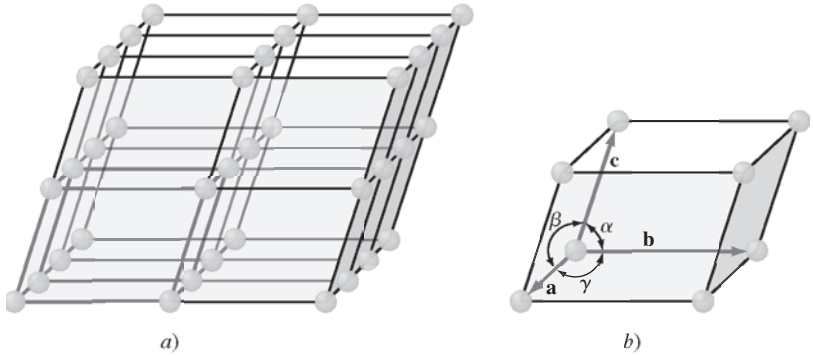


Figura 3.1
a) Red espacial de un sólido cristalino ideal y *b*) celda unitaria mostrando las constantes de red.

El ordenamiento atómico en los sólidos cristalinos se puede describir representando a los átomos en los puntos de intersección de una red tridimensional. Esta red se llama **red espacial** (figura 3.1*a*) y puede describirse como un ordenamiento tridimensional infinito de puntos. Cada punto en la red espacial tiene un entorno idéntico. En un **cristal** ideal la agrupación de **puntos de la red** alrededor de uno cualquiera es idéntica a la agrupación en torno a otro punto de la red en la red espacial. Cada red espacial puede describirse especificando la posición de los átomos en una **celda unitaria** repetitiva, como la que se muestra en la figura 3.1*a*. Un grupo de átomos organizados en una disposición determinada en relación unos con otros y asociados con puntos de la red, constituye un **motivo** o base. La estructura del cristal podría ser entonces definida como la colección de redes espaciales y bases. El tamaño y forma de una celda puede describirse por tres vectores de la red **a**, **b** y **c**, con origen en un vértice de la celda unitaria. Las longitudes axiales *a*, *b* y *c* y los ángulos interaxiales α, β y γ son *las constantes de la red* de la celda unitaria.

3.2 SISTEMAS CRISTALINOS Y REDES DE BRAVAIS

Tutorial

Asignando los valores específicos para las longitudes axiales y ángulos interaxiales, se pueden construir celdas unitarias de diferentes tipos. Los cristalógrafos han demostrado que tan sólo se necesitan siete tipos diferentes de celdas unitarias para crear todas las redes. Estos sistemas cristalinos se detallan en la tabla 3.1.

Muchos de los siete sistemas cristalinos tienen variaciones de la celda unitaria básica. A. J. Bravais[1] demostró que con 14 celdas unitarias estándar se pueden describir todas las redes posibles. Estas redes de Bravais se presentan en la figura 3.2. Existen cuatro tipos básicos de celdas unitarias: 1) sencilla, 2) centrada en el cuerpo, 3) centrada en las caras y 4) centrada en las bases.

[1] August Bravais (1811-1863). Cristalógrafo francés que estableció los 14 posibles ordenamientos de puntos en el espacio.

Tabla 3.1 Clasificación de redes espaciales para sistemas cristalinos

Sistema cristalino	Longitudes axiales y ángulos interaxiales	Redes espaciales
Cúbico	Tres ejes iguales en ángulos rectos $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90°$	Cúbico sencillo Cúbico centrado en el cuerpo Cúbico centrado en las caras
Tetragonal	Tres ejes en ángulos rectos, dos iguales $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90°$	Tetragonal sencillo Tetragonal centrado en el cuerpo
Ortorrómbico	Tres ejes distintos en ángulos rectos $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90°$	Ortorrómbico sencillo Ortorrómbico centrado en el cuerpo Ortorrómbico centrado en las bases Ortorrómbico centrado en las caras
Romboédrico	Tres ejes iguales, inclinados por igual $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90°$	Romboédrico sencillo
Hexagonal	Dos ejes iguales a 120º y un tercero en ángulo recto $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90°,$ $\gamma = 120°$	Hexagonal sencillo
Monoclínico	Tres ejes distintos, dos de ellos no forman ángulo recto $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90° \neq \beta$	Monoclínico sencillo Monoclínico centrado en las bases
Triclínico	Tres ejes desiguales con distinta inclinación y ninguno en ángulo recto $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$	Triclínico sencillo

MatVis

En el sistema cúbico hay tres tipos de celdas unitarias: cúbica sencilla, cúbica centrada en el cuerpo y cúbica centrada en las caras. En el sistema ortorrómbico se encuentran los cuatro tipos. En el sistema tetragonal existen sólo dos: simple y centrado en el cuerpo. La celda unitaria tetragonal centrada en las caras no existe pero se puede construir con cuatro celdas unitarias tetragonales centradas en el cuerpo. El sistema monoclínico tiene celdas unitarias simples y centradas en la base, y los sistemas romboédrico, hexagonal y triclínico tienen sólo celdas unitarias simples.

3.3 PRINCIPALES ESTRUCTURAS CRISTALINAS METÁLICAS

En este capítulo se expondrán con detalle las principales estructuras cristalinas de los metales puros. En el capítulo 10 se tratarán las principales estructuras cristalinas iónicas y covalentes que se presentan en los materiales cerámicos.

La mayoría de los metales puros (aproximadamente 90%) cristalizan al solidificar en tres estructuras cristalinas compactas: **cúbica centrada en el cuerpo (BBC)** (figura 3.3*a*), **cúbica centrada en las caras (FCC)** (figura 3.3*b*) y **hexagonal compacta (HCP)** (figura 3.3*c*). La estructura HCP es una modificación más densa de la estructura cristalina hexagonal simple mostrada en la figura 3.2. La mayoría de los metales cristalizan en estas estructuras empacadas densamente porque la energía disminuye a medida que los átomos se acercan y se enlazan entre sí. De este modo, las estructuras más compactas corresponden a ordenamientos de niveles energéticos menores y más estables.

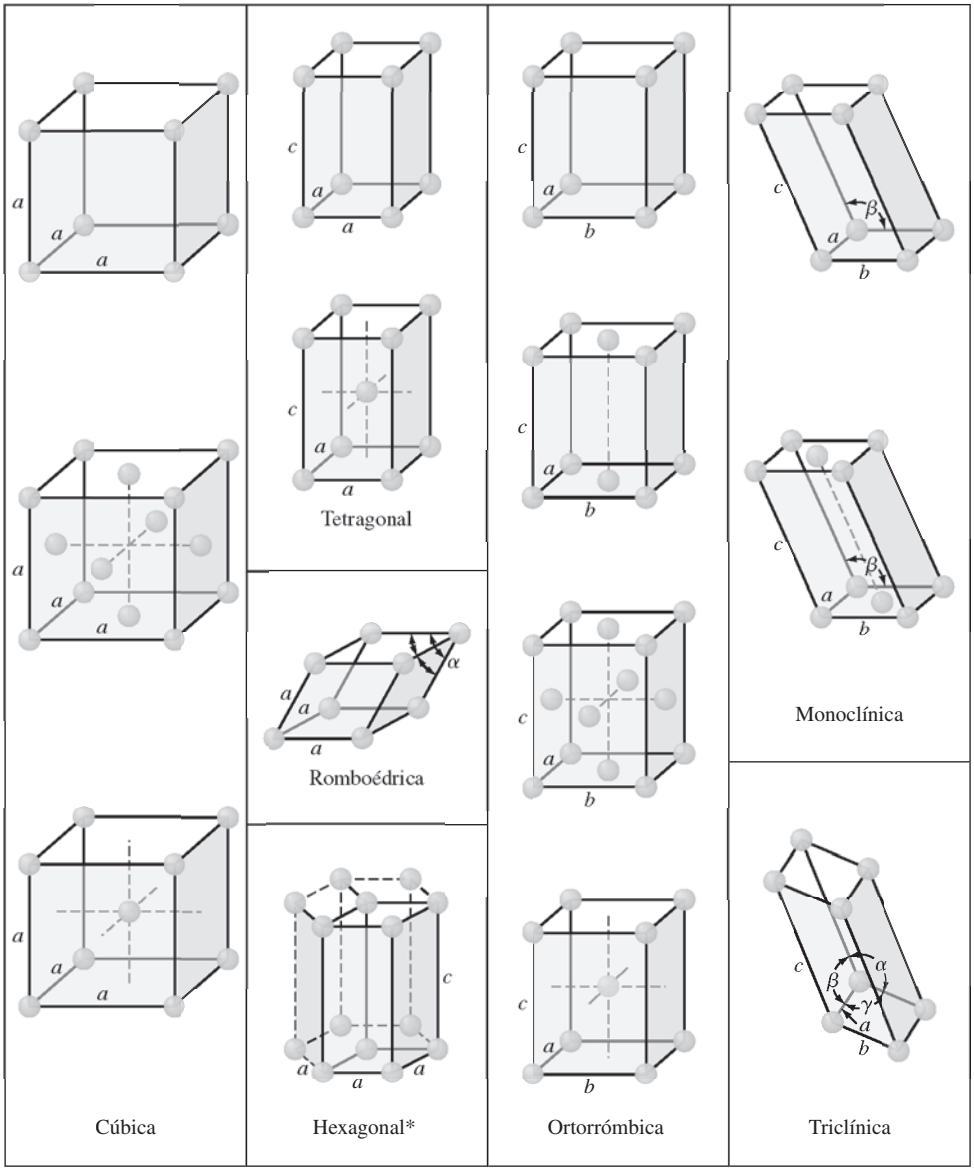


Figura 3.2
Las 14 celdas unitarias de Bravais agrupadas según los sistemas cristalinos. Las esferas indican puntos de la red que, cuando están situados en las caras o en los vértices, son compartidos con otras celdas unitarias idénticas.
(Según W. G. Moffatt, G. W. Pearsall y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. I, "Structure", Wiley, 1964, p. 47.)
**La celda unitaria está representada por las líneas continuas.*

Tutorial
Animación
MatVis

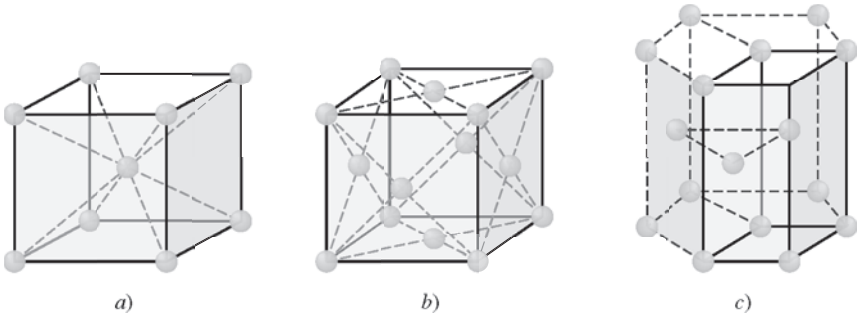


Figura 3.3
Principales celdas unitarias en las estructuras cristalinas de los metales: *a*) cúbica centrada en el cuerpo, *b*) cúbica centrada en las caras y *c*) hexagonal compacta.

Debe subrayarse el tamaño extremadamente pequeño de las celdas unitarias de las estructuras cristalinas metálicas que se muestran en la figura 3.3. La arista del cubo de la celda unitaria del hierro cúbico centrado en el cuerpo, por ejemplo, a temperatura ambiente es igual a 0.287×10^{-9} m, o 0.287 nanómetros (nm).[2] Por tanto, si se alinean celdas unitarias de hierro puro, arista con arista, en 1 mm habría:

$$1 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ celda unitaria}}{0.287 \text{ nm} \times 10^{-6} \text{ mm/nm}} = 3.48 \times 10^{6} \text{ celdas unitarias}$$

Examinemos ahora a detalle la disposición de los átomos en las celdas unitarias de las tres principales estructuras cristalinas metálicas. Aunque se trata de una aproximación, se tomarán en cuenta los átomos en estas estructuras como si se trataran de esferas rígidas. La distancia entre los átomos (distancia interatómica) en las estructuras cristalinas puede determinarse experimentalmente por análisis de difracción de rayos X.[3] Por ejemplo, la distancia interatómica entre dos átomos de aluminio en un trozo de aluminio puro a 20°C es de 0.2862 nm. El radio del átomo de aluminio en el aluminio metálico se toma como la unidad de esta distancia interatómica, es decir, 0.143 nm. En las tablas 3.2 a 3.4 se dan los valores de radios atómicos para algunos metales.

3.3.1 Estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC)

Animación
Tutorial

Considérese en primer lugar la posición de los átomos en la celda unitaria para la estructura cristalina BCC mostrada en la figura 3.4*a*. En esta celda unitaria las esferas representan los puntos donde están colocados los átomos e indican claramente sus posiciones relativas. Si se representan los átomos en esta celda como esferas rígidas, la representación de la celda unitaria corresponde a la mostrada en la figura 3.4*b*. En esta celda unitaria se observa que el átomo central está rodeado por ochos vecinos más próximos y se dice que tiene un número de coordinación de 8.

[2] 1 nanómetro = 10^{-9} metros.
[3] Algunos de los principios del análisis de difracción de rayos X se estudiarán en la sección 3.11.

Tabla 3.2 Metales seleccionados que tienen estructura cristalina BCC a temperatura ambiente (20°C) y su constante de red y radio atómico

Metal	Constante de red a (nm)	Radio atómico R* (nm)
Cromo	0.289	0.125
Hierro	0.287	0.124
Molibdeno	0.315	0.136
Potasio	0.533	0.231
Sodio	0.429	0.186
Tántalo	0.330	0.143
Volframio	0.316	0.137
Vanadio	0.304	0.132

*Calculado a partir de la constante de red utilizando la ecuación (3.1), $R = \sqrt{3}a/4$.

Tutorial

Tabla 3.3 Metales seleccionados que tienen estructura cristalina FCC a temperatura ambiente (20°C) y su constante de red y radio atómico

Metal	Constante de red a (nm)	Radio atómico R* (nm)
Aluminio	0.405	0.143
Cobre	0.3615	0.128
Oro	0.408	0.144
Plomo	0.495	0.175
Níquel	0.352	0.125
Platino	0.393	0.139
Plata	0.409	0.144

*Calculado a partir de la constante de red utilizando la ecuación (3.3), $R = \sqrt{2}a/4$.

Tabla 3.4 Metales seleccionados que tienen estructura cristalina HCP a temperatura ambiente (20°C) y su constante de red, radio atómico y relación c/a

Metal	Constante de red (nm)		Radio atómico R (nm)	Relación c/a	% de desviación de la relación ideal
	a	c			
Cadmio	0.2973	0.5618	0.149	1.890	+15.7
Zinc	0.2665	0.4947	0.133	1.856	+13.6
HCP ideal				1.633	0
Magnesio	0.3209	0.5209	0.160	1.623	−0.66
Cobalto	0.2507	0.4069	0.125	1.623	−0.66
Circonio	0.3231	0.5148	0.160	1.593	−2.45
Titanio	0.2950	0.4683	0.147	1.587	−2.81
Berilio	0.2286	0.3584	0.113	1.568	−3.98

Si se aísla una sola celda unitaria como esfera sólida, se obtiene el modelo mostrado en la figura 3.4*c*. Cada una de estas celdas tiene el equivalente a dos átomos por celda unitaria. Un átomo entero se encuentra en el centro de la celda unitaria y un octavo de esfera se encuentra en cada vértice de la celda, lo que equivale a otro átomo. Así, hay un total de 1 (en el centro) + $8 \times \frac{1}{8}$ (en los vértices) = 2 átomos por celda unitaria. En la celda unitaria BCC los átomos de cada vértice entran en con-

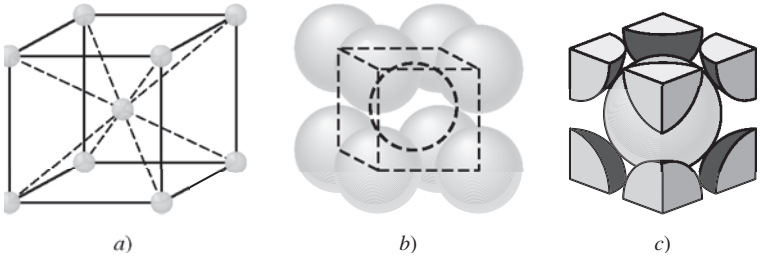


Figura 3.4
Celdas unitarias BCC: *a*) de posiciones atómicas, *b*) de esferas rígidas y *c*) aislada.

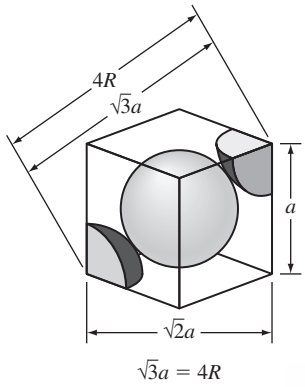


Figura 3.5
Celda unitaria BCC que muestra la relación entre la constante de red *a* y el radio atómico *R*.

Tutorial
Animación
MatVis

tacto entre sí a lo largo de la diagonal del cubo, como se muestra en la figura 3.5, de tal suerte que la relación entre la arista del cubo a y el radio atómico R es

$$\sqrt{3}a = 4R \quad \text{o} \quad a = \frac{4R}{\sqrt{3}} \tag{3.1}$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.1

El hierro a 20°C es BCC con átomos con un radio atómico de 0.124. Calcule la constante de red a para el vértice del cubo de la celda unitaria de hierro.

■ Solución

En la figura 3.5 se observa que los átomos que están en la celda unitaria BCC se tocan a través de las diagonales del cubo. Por tanto, si a es la longitud del vértice del cubo, entonces

$$\sqrt{3}a = 4R \tag{3.1}$$

Donde R es el radio del átomo de hierro. Por consiguiente

$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}} = \frac{4(0.124 \text{ nm})}{\sqrt{3}} = 0.2864 \text{ nm} \blacktriangleleft$$

Si los átomos de la celda unitaria BCC se consideran como esféricos, se puede calcular el **factor de empaquetamiento atómico** (APF) aplicando la ecuación

$$\text{APF} = \frac{\text{volumen de los átomos en la celda unitaria}}{\text{volumen de la celda unitaria}} \tag{3.2}$$

Aplicando esta ecuación, el APF para la celda unitaria BCC (figura 3.3*a*) resulta de 68% (véase ejemplo de problema 3.2). Esto es, 68% del volumen de la celda unitaria (BCC) está ocupado por átomos, y 32% es de espacio vacío. La estructura cristalina BCC *no* es una estructura compacta, dado que los átomos podrían situarse aún más juntos. Muchos metales como el hierro, cromo, volframio, molibdeno y vanadio tienen la estructura cristalina BCC a temperatura ambiente. En la tabla 3.2 se muestran las constantes de red y el radio atómico para varios metales BCC.

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.2

Calcule el factor de empaquetamiento atómico (APF) para la celda unitaria BCC, considerando a los átomos como esferas rígidas.

■ **Solución**

$$\text{APF} = \frac{\text{volumen de los átomos en la celda unitaria BCC}}{\text{volumen de la celda unitaria BCC}} \quad \textbf{(3.2)}$$

Tutorial

Dado que hay dos átomos por celda unitaria BCC, el volumen de los átomos de radio R en una celda unitaria es

$$V_{\text{átomos}} = (2)(\tfrac{4}{3}\pi R^3) = 8.373R^3$$

El volumen de la celda unitaria BCC es:

$$V_{\text{celda unitaria}} = a^3$$

donde a es la constante de red. La relación entre a y R se obtiene a partir de la figura 3.5, que muestra cómo los átomos de la celda unitaria hacen contacto a través de la diagonal del cubo. Así,

$$\sqrt{3}a = 4R \quad \text{o} \quad a = \frac{4R}{\sqrt{3}} \quad \textbf{(3.1)}$$

Así,

$$V_{\text{celda unitaria}} = a^3 = 12.32R^3$$

El factor de empaquetamiento atómico para la celda unitaria BCC resulta

$$\text{APF} = \frac{V_{\text{átomos}}/\text{celda unitaria}}{V_{\text{celda unitaria}}} = \frac{8.373R^3}{12.32R^3} = 0.68 \blacktriangleleft$$

3.3.2 Estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC)

Considérese ahora la representación mediante puntos de la celda unitaria FCC de la figura 3.6*a*. En esta celda unitaria hay un átomo en cada vértice del cubo y uno en el centro de cada cara. El modelo de esferas rígidas de la figura 3.6*b* indica que los átomos de la estructura cristalina FCC están empacados tan juntos como es posible. El factor de empaquetamiento para esta estructura compacta es de 0.74, que comparado con 0.68 de la estructura BCC, indica que esta última no es compacta.

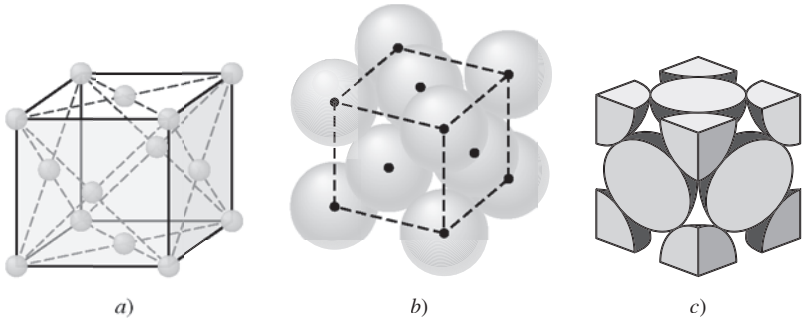


Figura 3.6
Celdas unitarias FCC: *a*) de posiciones atómicas, *b*) de esferas rígidas y *c*) aislada.

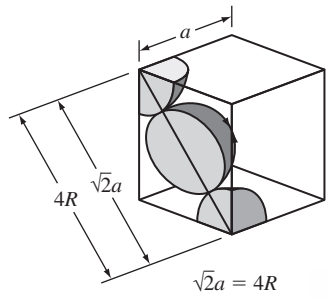


Figura 3.7
Celda unitaria FCC que muestra la relación entre la constante de red *a* y el radio atómico *R*. En donde se tocan los átomos a lo largo de la cara de las diagonales, $\sqrt{2}a = 4R$.

Tutorial
Animación
MatVis

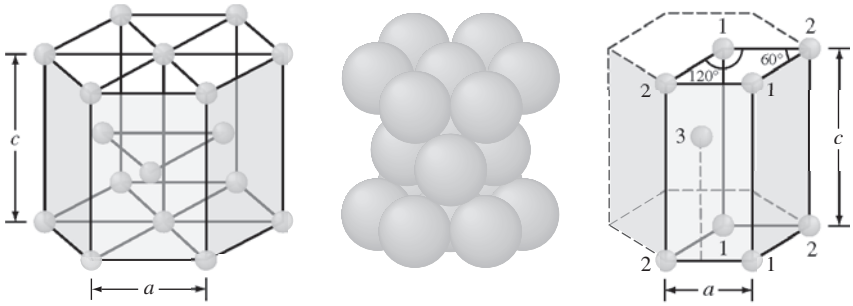
La celda unitaria FCC tal como se muestra en la figura 3.6*c* tiene un equivalente de cuatro átomos por celda unitaria. Los ocho octavos de los vértices cuentan como un átomo ($8 \times \frac{1}{8} = 1$), y los seis medios átomos que están sobre las caras del cubo contribuyen con otros tres átomos, que dan un total de cuatro átomos por celda unitaria. En la celda FCC, los átomos se contactan en la diagonal de la cara del cubo como se indica en la figura 3.7, por lo que la relación entre la arista del cubo a y el radio atómico R es

$$\sqrt{2}a = 4R \quad \text{o} \quad a = \frac{4R}{\sqrt{2}} \tag{3.3}$$

El APF para la estructura cristalina FCC es de 0.74, que es mayor que el factor 0.68 de la estructura BCC. Un APF de 0.74 es el máximo de compacto posible para "átomos esféricos". Muchos metales como el aluminio, cobre, plomo, níquel y hierro a temperatura elevada (de 912 a 1 394°C) cristalizan con la estructura FCC. En la tabla 3.3 se presentan las constantes de red y los radios atómicos para algunos metales FCC.

3.3.3 Estructura cristalina hexagonal compacta (HCP)

La tercera estructura cristalina más común en los metales es la estructura HCP presentada en las figuras 3.8*a* y *b*. Los metales no cristalizan con la estructura cristalina hexagonal sencilla que se muestra en la figura 3.2 porque el APF es demasiado bajo. Los átomos pueden alcanzar una menor energía y una condición más estable formando la estructura HCP de la figura 3.8*b*. El APF de la estructura cristalina HCP es de 0.74, el mismo que el de la estructura FCC, ya que en ambas estructuras los átomos están empacados lo más juntos posible. En ambas estructuras, HCP y FCC, cada átomo está rodeado de 12 átomos, por tanto, cada átomo tiene un número de coordinación de 12. Las diferencias entre el ordenamiento atómico en las estructuras cristalinas FCC y HCP se expondrán en la sección 3.8.



Tutorial MatVis

Figura 3.8
Estructura cristalina HCP: *a*) esquema de la estructura cristalina, *b*) modelo de esfera dura y *c*) esquema de celda unitaria aislada
[*b) y c) Según F. M. Miller, "Chemistry, Structure and Dynamics", McGraw-Hill, 1984, p. 296.*]

En la figura 3.8*c* se muestra la celda unitaria HCP aislada, también llamada celda primitiva. Los átomos de los lugares marcados con "1" contribuyen con $\frac{1}{6}$ de un átomo a la celda unitaria, y los átomos de la ubicación marcados con "2" contribuyen con $\frac{1}{12}$ de átomo. Por consiguiente, los átomos de los ocho vértices de la celda unitaria contribuyen de manera colectiva con un átomo ($4(\frac{1}{6}) + 4(\frac{1}{12}) = 1$). El átomo de la ubicación "3" está centrado dentro de la celda unitaria pero se extiende más allá del límite de ésta. El número total de átomos dentro de una celda unitaria HCP* es, por tanto, de 2 (1 en los vértices y 1 en el centro).

La relación entre la altura *c* del prisma hexagonal de la estructura cristalina HCP y la arista de la base *a*, se llama *relación c/a* (figura 3.8*a*). La *relación c/a* para una estructura HCP ideal formada por esferas empacadas al máximo es 1.633. En la tabla 3.4 se presentan algunos de los principales metales HCP y su relación *c/a*. De los metales presentados, el cadmio y el zinc tienen una relación *c/a* superior a la ideal, lo que indica que los átomos en estas estructuras están ligeramente alargados a lo largo del eje *c* de la celda unitaria HCP. Los metales magnesio, cobalto, circonio, titanio y berilio tienen una relación *c/a* menor que la relación ideal. Por tanto, en estos metales los átomos están ligeramente comprimidos en la dirección del eje *c*. Así, los metales que se listan en la tabla 3.4 presentan una cierta desviación del modelo ideal de esferas rígidas.

* En algunos libros de texto la celda unitaria HCP se representa mediante la figura 3.8*a* y se denomina "celda mayor". En ese caso, se encuentran seis átomos por celda unitaria. Esto se hace principalmente por comodidad y la celda unitaria verdadera se representa en la figura 3.8*c* con las líneas continuas. Al presentar los temas de direcciones y planos cristalinos, también se empleará la celda mayor por comodidad.

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.3

Calcule el volumen de la celda unitaria de la estructura cristalina del zinc con los datos siguientes: el zinc puro tiene una estructura cristalina HCP con unas constantes de red $a = 0.2665$ nm y $c = 0.4947$ nm.

■ **Solución**

El volumen de la celda unitaria HCP del zinc puede obtenerse determinando el área de la base de la celda unitaria y multiplicando ésta por su altura (figura 3.9).

El área de la base de la celda unitaria es el área *ABDEFG* de la figura 3.9*a* y *b*. Esta área total consiste en la suma de las áreas de seis triángulos equiláteros de área *ABC* de la figura 3.9*b*. A partir de la figura 3.9*c*,

$$\text{Área del triángulo } ABC = \tfrac{1}{2}(\text{base})\ (\text{altura})$$
$$= \tfrac{1}{2}(a)(a \operatorname{sen} 60°) = \tfrac{1}{2}a^2 \operatorname{sen} 60°$$

A partir de la figura 3.9*b*,

$$\text{El área total de la base de HCP} = (6)(\tfrac{1}{2}a^2 \operatorname{sen} 60°)$$
$$= 3a^2 \operatorname{sen} 60°$$

A partir de la figura 3.9*a*,

$$\text{Volumen de la celda unitaria HCP del zinc} = (3a^2 \operatorname{sen} 60°)\ (c)$$
$$= (3)(0.2665\ \text{nm})^2(0.8660)(0.4947\ \text{nm})$$
$$= 0.0913\ \text{nm}^3 \blacktriangleleft$$

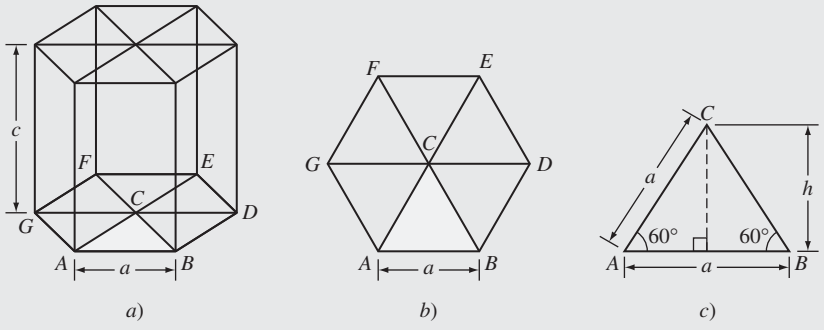
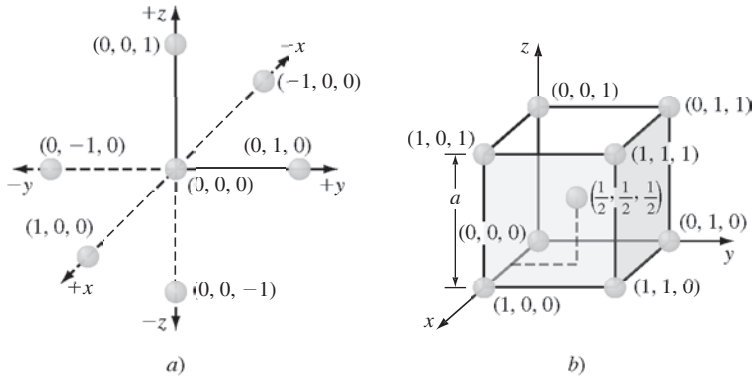


Figura 3.9
Diagramas para calcular el volumen de la celda unitaria HCP. *a*) Celda unitaria HCP, *b*) Base de la celda unitaria HCP, *c*) Triángulo *ABC* separado de la base de la celda unitaria.

3.4 POSICIONES DEL ÁTOMO EN CELDAS UNITARIAS CÚBICAS

Para situar las posiciones atómicas en las celdas unitarias cúbicas se utilizan los ejes cartesianos *x*, *y* y *z*. En cristalografía, la zona positiva del eje *x* es generalmente la situada hacia afuera del papel, la zona positiva del eje *y* es la situada hacia la derecha del papel, y la zona positiva del eje *z* es la situada hacia arriba del papel (figura 3.10). Las zonas negativas son las opuestas a las que se han descrito.

Las posiciones de los átomos en la celda unitaria se localizan mediante distancias unitarias a lo largo de los ejes *x*, *y* y *z*, como se indica en la figura 3.10*a*. Por



Tutorial

Figura 3.10
a) Ejes cartesianos *x*, *y* y *z* para situar las posiciones atómicas en celdas unitarias cúbicas, y *b*) posiciones atómicas en la celda unitaria BCC.

ejemplo, las coordenadas de posición para los átomos en la celda unitaria BCC se muestran en la figura 3.10*b*. Las posiciones atómicas para los átomos situados en los vértices de la celda unitaria BCC, son

(0, 0, 0) (1, 0, 0) (0, 1, 0) (0, 0, 1)
(1, 1, 1) (1, 1, 0) (1, 0, 1) (0, 1, 1)

El átomo central de la celda unitaria BCC tiene las coordenadas en posición $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$. Por sencillez, suelen especificarse sólo dos posiciones atómicas en la celda unitaria BCC, que son (0, 0, 0) y $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$. Las posiciones atómicas restantes de la celda unitaria BCC se consideran sobreentendidas. De forma análoga se pueden localizar las posiciones atómicas en la celda unitaria FCC.

3.5 DIRECCIONES EN LAS CELDAS UNITARIAS CÚBICAS

A menudo es necesario referirse a ubicaciones específicas en las redes cristalinas. Esto es de especial importancia para los metales y las aleaciones con propiedades que varían con la orientación cristalográfica. *Para los cristales cúbicos los* **índices de las direcciones** *cristalográficas son los componentes del vector de dirección descompuesto sobre cada eje de coordenada y reducidos a mínimos enteros.*

Para indicar en forma gráfica una dirección en una celda unitaria cúbica, se dibuja un vector de dirección desde un origen, que generalmente es un vértice de la celda cúbica, hasta que emerge a la superficie del cubo (figura 3.11). Las coordenadas de posición de la celda unitaria donde el vector de dirección emerge de la superficie del cubo después de convertirlas en enteros, son los índices de dirección. Estos índices se colocan entre corchetes sin separación por comas.

Por ejemplo, las coordenadas de posición del vector de dirección *OR* de la figura 3.11*a* cuando sale a la superficie del cubo, son (1, 0, 0), y así, los índices de dirección para el vector de dirección *OR* son [100]. Las coordenadas de posición del

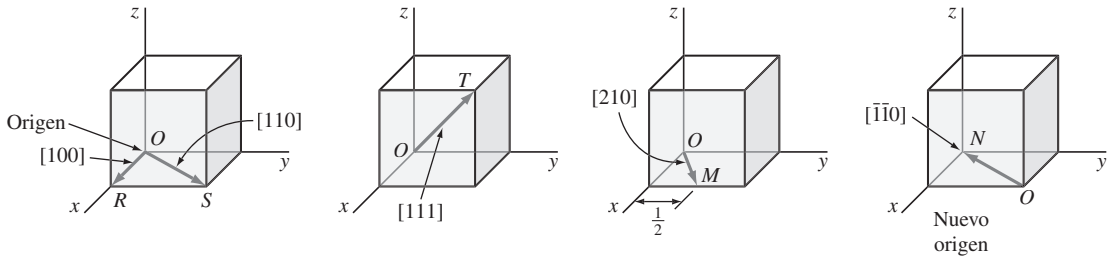


Figura 3.11
Algunas direcciones en celdas unitarias cúbicas.

Tutorial

vector de dirección *OS* (figura 3.11*a*) son (1, 1, 0), por tanto, los índices de dirección para *OS* son [110]. Las coordenadas de posición del vector de dirección *OT* (figura 3.11*b*), son (1, 1, 1), por tanto, los índices de dirección para *OT* son [111].

Las coordenadas de posición del vector de dirección *OM* (figura 3.11*c*), son $(1, \frac{1}{2}, 0)$, y como los índices de dirección deben ser números enteros, estas coordenadas de posición deben multiplicarse por 2 para obtener los enteros. Así, los índices de dirección de *OM* pasan a ser $2(1, \frac{1}{2}, 0) = [210]$. Las coordenadas de posición del vector de dirección *ON* (figura 3.11*d*), son $(-1,-1, 0)$. Un índice de dirección negativo se escribe con una barra encima del índice. Así, los índices de dirección para *ON* son $[\bar{1}\,\bar{1}0]$. Obsérvese que para dibujar la dirección *ON* en el cubo, el origen del vector de dirección ha tenido que trasladarse al vértice inferior derecho del cubo unidad (figura 3.11*d*). Otros ejemplos de vectores de dirección cúbicos se dan en el problema de ejemplo 3.4.

En general, se utilizan las letras *u*, *v*, *w* como índices de dirección en las direcciones *x*, *y* y *z*, respectivamente, y se escriben como [*uvw*]. Es también importante darse cuenta de que *todos los vectores de dirección paralelos tienen el mismo índice de dirección.*

Las direcciones serán *cristalográficamente equivalentes* si el espacio atómico en cada dirección es el mismo. Por ejemplo, las direcciones de las aristas del cubo son direcciones cristalográficamente equivalentes:

$$[100],\ [010],\ [001],\ [0\bar{1}0],\ [00\bar{1}],\ [\bar{1}00] \equiv \langle 100 \rangle$$

Las direcciones equivalentes se llaman *índices de una familia o tipo*. La notación $\langle 100 \rangle$ se utiliza para indicar colectivamente las direcciones de las aristas del cubo. Otras direcciones son las diagonales del cubo $\langle 111 \rangle$ y las diagonales de las caras del cubo $\langle 110 \rangle$.

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.4

Dibuje los siguientes vectores de dirección en celdas unitarias cúbicas.

a) [100] y [110]
b) [112]
c) $[\bar{1}10]$
d) $[\bar{3}2\bar{1}]$

■ Solución

a) Las coordenadas de posición para la dirección [100] son (1, 0, 0) (figura 3.12*a*). Las coordenadas de posición para la dirección [110] son (1, 1, 0) (figura 3.12*a*).

b) Las coordenadas de posición para la dirección [112] se obtienen dividiendo los índices de dirección entre 2, para que queden dentro del cubo unidad. Así, serán $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1)$ (figura 3.12*b*).

c) Las coordenadas de posición para la dirección $[\bar{1}10]$ son $(-1, 1, 0)$ (figura 3.12*c*). Obsérvese que el origen para el vector dirección debe moverse al vértice inferior izquierdo del cubo.

d) Las coordenadas de posición para la dirección $[\bar{3}2\bar{1}]$ se han obtenido dividiendo primero todos los índices entre 3, que es el índice mayor. Así se obtiene $-1, \frac{2}{3}, -\frac{1}{3}$ para las coordenadas de posición del punto de salida de la dirección $[\bar{3}2\bar{1}]$, como se muestra en la figura 3.12*d*.

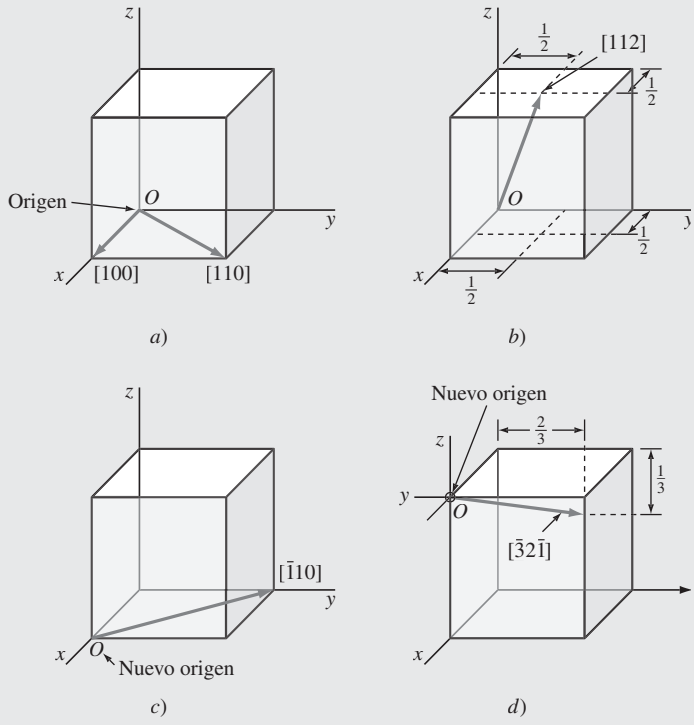


Figura 3.12
Vectores de dirección en celdas unitarias cúbicas.

Tutorial

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.5

Determine los índices de dirección de la dirección del cubo mostrada en la figura EP3.5*a*.

■ Solución

Las *direcciones paralelas tienen los mismos índices de dirección*, y por ello se mueve el vector de dirección de forma paralela hasta que su origen alcanza el vértice más próxi-

mo del cubo, manteniendo el vector en el cubo. Así, en este caso, el vértice superior izquierdo se convierte en el nuevo origen del vector de dirección (figura EP3.5*b*). Ahora se pueden determinar las coordenadas de posición donde el vector de dirección deja el cubo unidad. Éstas son $x = -1$, $y = +1$ y $z = -\frac{1}{6}$. Las coordenadas de posición de la dirección donde deja el cubo unidad son $(-1, +1, -\frac{1}{6})$. Para esta dirección, los índices son, después de eliminar la fracción $6x$, $(-1, +1, -\frac{1}{6})$, o $[\bar{6}6\bar{1}]$.

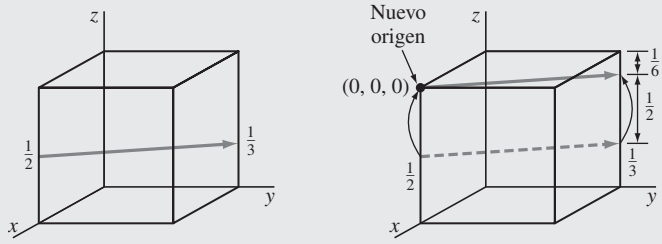


Figura EP3.5

Tutorial

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.6

Determine los índices de dirección de la dirección cúbica entre las coordenadas de posición $(\frac{3}{4}, 0, \frac{1}{4})$ y $(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$.

■ Solución

Primero se localizan los puntos del origen y final del vector de dirección en un cubo unidad, como se muestra en la figura EP3.6. Los componentes fraccionarios del vector para esta dirección son:

$$x = -(\tfrac{3}{4} - \tfrac{1}{4}) = -\tfrac{1}{2}$$
$$y = (\tfrac{1}{2} - 0) = \tfrac{1}{2}$$
$$z = (\tfrac{1}{2} - \tfrac{1}{4}) = \tfrac{1}{4}$$

Así, el vector de dirección tiene los componentes fraccionarios $-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$. Los índices de dirección estarán en la misma relación que sus componentes fraccionarios. Multiplicando los componentes de la fracción por 4, se obtendrá $[\bar{2}21]$ para los índices de dirección de este vector de dirección.

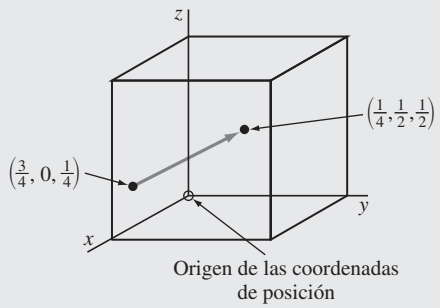


Figura EP.3.6

3.6 ÍNDICES DE MILLER PARA LOS PLANOS CRISTALOGRÁFICOS EN CELDAS UNITARIAS CÚBICAS

A veces es necesario referirse a los planos reticulares específicos de los átomos que se encuentran en una estructura cristalina, o puede ser interesante conocer la orientación cristalográfica de un plano o de grupos de planos en una red cristalina. Para identificar a los planos cristalinos en una estructura cristalina cúbica se utiliza el *sistema de notación de Miller*.[4] Los **índices de Miller de un plano cristalino** se definen como el *recíproco de las fracciones de intersección (con fracciones simplificadas) que el plano presenta con los ejes cristalográficos x, y* y *z de las tres aristas no paralelas de la celda unitaria cúbica*. Las aristas del cubo en la celda unitaria representan longitudes unidad y las intersecciones de los planos reticulares se miden con base en estas longitudes unidad.

El procedimiento para determinar los índices de Miller para un plano cristalográfico cúbico es como sigue:

Tutorial

1. Se elige un plano que *no* pase por el origen de coordenadas (0, 0, 0).

2. Se determinan las intersecciones del plano en la función de los ejes cristalográficos x, y y z para un cubo unidad. Estas intersecciones pueden ser fraccionarias.

3. Se obtiene el recíproco de las intersecciones.

4. Se simplifican las fracciones y se determina el *conjunto más pequeño* de números enteros que estén en la misma proporción que las intersecciones. Este conjunto de números enteros son los índices de un plano cristalográfico y se encierran en paréntesis sin utilizar comas. La notación (*hkl*) se utiliza para indicar los índices de Miller en un sentido general, donde h, k y l son los índices de Miller de un plano cristalino cúbico para los ejes x, y y z, respectivamente.

En la figura 3.13 se muestran tres de los planos cristalográficos más importantes de una estructura cristalina cúbica. Considérese en primer lugar el plano sombreado de la figura 3.13*a*, que tiene las intersecciones 1, ∞, ∞ para los ejes x, y y z, respectivamente. Si se toman los recíprocos de estas intersecciones para obtener los índices de Miller, serán, por tanto, 1, 0, 0. Como estos números no son fraccionarios, los índices de Miller para este plano son (100), que se lee como plano uno-cero-cero. Considérese ahora el segundo plano mostrado en la figura 3.13*b*. Las intersecciones en este plano son 1, 1, ∞. Dado que los recíprocos de estos números son 1, 1, 0, que no presentan fracciones, los índices de Miller de este plano son (110). Finalmente, el tercer plano (figura 3.13*c*) tiene las intersecciones 1, 1, 1, que corresponde a unos índices de Miller (111).

Considérese ahora el plano cúbico cristalino presentado en la figura 3.14 que tiene las intersecciones $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$, 1. Los recíprocos de estas intersecciones son 3, $\frac{3}{2}$, 1. Dado que estas intersecciones no son enteros, estas intersecciones deben multiplicarse por dos para simplificar la fracción $\frac{3}{2}$. Por tanto, el recíproco de las intersecciones

[4] William Hallowes Miller (1801-1880). Cristalógrafo inglés que publicó en 1839 un "Treatise on Crystallography", utilizando ejes cristalográficos de referencia paralelos a las aristas del cristal y aplicando índices recíprocos.

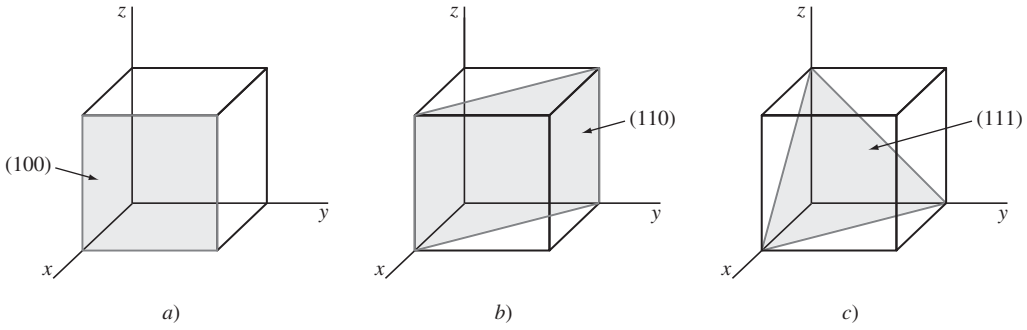


Figura 3.13
Índices de Miller de algunos planos cristalinos cúbicos importantes: *a*) (100), *b*) (110) y *c*) (111).

Tutorial MatVis

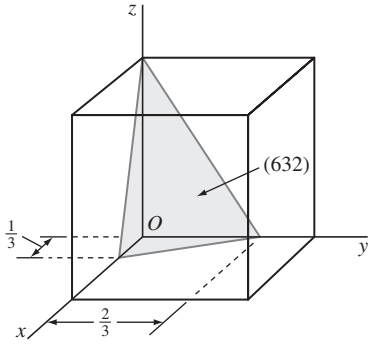


Figura 3.14
Plano de cristal cúbico (632), que tiene intersecciones fraccionarias.

se convierten en 6, 3, 2 y los índices de Miller son (632). Otros ejemplos de planos cristalinos cúbicos se presentan en el problema de ejemplo 3.7.

Si el plano cristalino considerado pasa por el origen de tal forma que una o más de las intersecciones son cero, el plano debe ser movido a una posición equivalente en la misma celda unitaria y el plano debe ser paralelo al plano original. Esto es posible porque todos los planos paralelos equidistantes se encuentran indicados por los mismos índices de Miller.

Si varios grupos de planos reticulares equivalentes están relacionados por la simetría del sistema cristalino, se llaman *planos de una familia o forma* y los índices de un plano de la familia se encierran entre llaves como {*hkl*} representando los índices de una familia de planos simétricos. Por ejemplo, los índices de Miller de los planos de las caras del cubo (100), (010) y (001) se designan conjuntamente como una familia o forma mediante la notación {100}.

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.7

Dibuje los siguientes planos cristalográficos en una celda unitaria cúbica:

a) (101) *b*) $(1\bar{1}0)$ *c*) (221).

d) Dibuje un plano (110) en una celda unitaria BCC de esferas e indique las coordenadas de posición de los átomos que están intersecados por este plano.

■ Soluciones

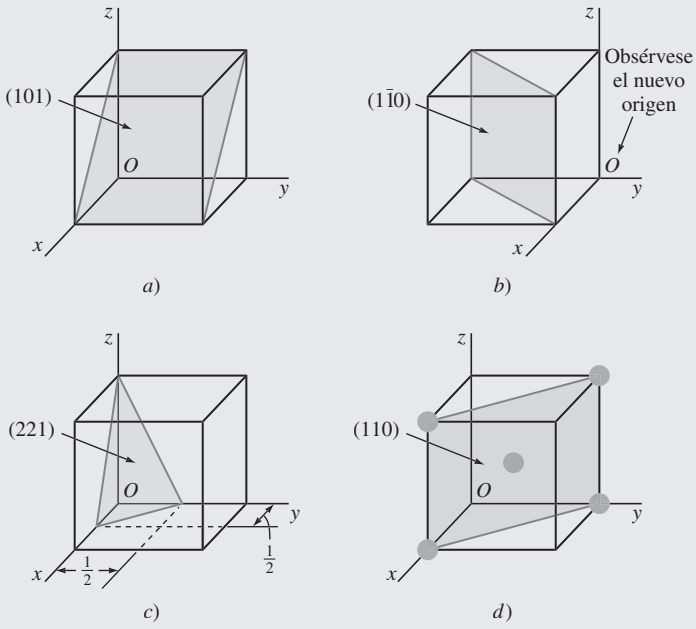


Figura EP3.7
Varios planos cristalinos cúbicos importantes.

MatVis

a) Determinar primero los recíprocos de los índices de Miller del plano (101). Éstos son 1, ∞, 1. El plano (101) debe pasar por el cubo unidad y cortar en $x = 1$ y $z = 1$ y ser paralelo al eje y.

b) Determinar primero los recíprocos de los índices de Miller del plano $(1\bar{1}0)$. Éstos son 1, −1, ∞. El plano $(1\bar{1}0)$ debe pasar por el cubo unidad y cortar en $x = 1$ y $y = -1$ y ser paralelo al eje z. Observe que el origen de los ejes debe desplazarse al vértice inferior posterior derecho del cubo.

c) Determinar primero los recíprocos de los índices de Miller del plano (221). Éstos son $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$, 1. El plano (221) debe pasar por el cubo unidad y cortar en intersecciones $x = \frac{1}{2}$, $y = \frac{1}{2}$ y $z = 1$.

d) Las posiciones atómicas cuyos centros están intersecados por el plano (110) son (1, 0, 0), (0, 1, 0), (1, 0, 1), (0, 1, 1) y $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$. Estas posiciones están indicadas por círculos sólidos.

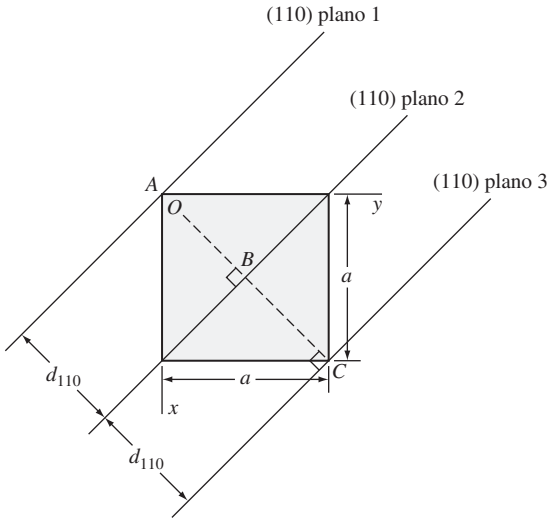


Figura 3.15
Vista superior de una celda unitaria cúbica mostrando la distancia entre los planos cristalinos (110), d_{110}.

Una relación importante en el sistema cúbico y *solamente en el sistema cúbico*, es que los índices de dirección de una dirección *perpendicular* a un plano cristalino tienen los mismos índices de Miller que el plano. Por ejemplo, la dirección [100] es perpendicular al plano cristalino (100).

En las estructuras cristalinas cúbicas, el *espaciado interplanar* entre dos planos paralelos con los mismos índices de Miller se indica como d_{hkl}, donde h, k y l son los índices de Miller de los planos. Este espaciado representa la distancia desde un origen elegido que contiene a un plano a otro plano paralelo con los mismos índices que sea cercano al primero. Por ejemplo, la distancia entre los planos (110) 1 y 2, d_{110}, en la figura 3.15 es AB. También la distancia entre los planos (110) 2 y 3 es d_{110} y su longitud es BC en la figura 3.15. Por simple geometría, se puede demostrar que para las estructuras cristalinas cúbicas

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \tag{3.4}$$

donde d_{hkl} = espaciado interplanar entre planos paralelos contiguos con índices de Miller h, k y l.

a = constante de red (arista del cubo unidad).

h, k, l = índices de Miller de los planos cúbicos considerados.

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.8

Determine los índices de Miller del plano cristalográfico cúbico mostrado en la figura EP3.8*a*.

■ Solución

Primero se traslada el plano paralelo al eje z $\frac{1}{4}$ de unidad a la derecha a lo largo del eje y, como se muestra en la figura EP3.8*b* hasta que el plano corta el eje x a una distancia uni-

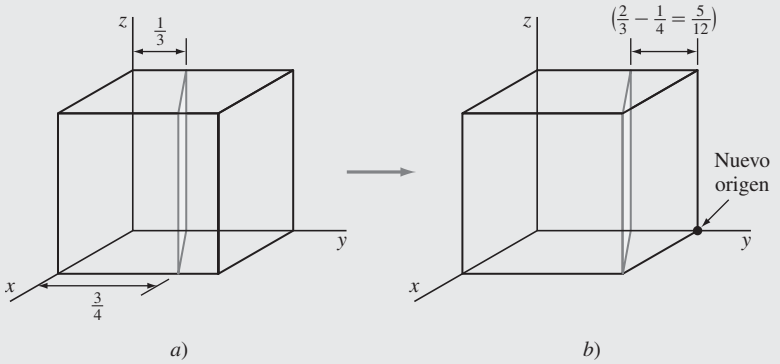


Figura EP3.8

dad a partir del nuevo origen localizado en el vértice inferior derecho del cubo. La nueva intersección del plano trasladado con los ejes de coordenadas es ahora $(+1, -\frac{5}{12}, \infty)$. Ahora se toma el recíproco de estas intersecciones, que es $(1, -\frac{12}{5}, 0)$. Finalmente, se elimina la fracción $\frac{12}{5}$, obteniendo $(5\overline{1}20)$ para los índices de Miller de este plano.

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.9

Determine los índices de Miller en un plano cristalino cúbico que intersecciona con las coordenadas de posición $(1, \frac{1}{4}, 0)$, $(1, 1, \frac{1}{2})$, $(\frac{3}{4}, 1, \frac{1}{4})$, y todos los ejes de las coordenadas.

■ Solución

Primero se localizan las tres posiciones coordenadas como se indica en la figura EP3.9 en *A*, *B* y *C*. A continuación se unen *A* y *B*, se continúa hasta *D*, y se unen *A* y *C*. Finalmente, se une *A* hasta *C* para completar el plano *ACD*. El origen de este plano en el cubo puede ser escogido en *E*, que da intersecciones axiales para el plano *ACD* en $x = -\frac{1}{2}$, $y = -\frac{3}{4}$ y $z = \frac{1}{2}$. Los recíprocos de estas intersecciones son -2, $-\frac{4}{3}$, y 2. Multiplicando estas intersecciones por 3 simplificamos las fracciones, dando unos índices de Miller para el plano $(\overline{6}\,\overline{4}6)$.

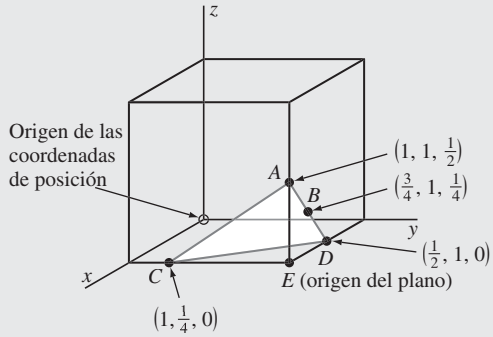


Figura EP3.9

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.10

El cobre tiene una estructura cristalina FCC y una celda unitaria con una constante de red de 0.361 nm. ¿Cuál es el espaciado interplanar d_{220}?

■ Solución

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} = \frac{0.361 \text{ nm}}{\sqrt{(2)^2 + (2)^2 + (0)^2}} = 0.128 \text{ nm} \blacktriangleleft$$

3.7 PLANOS CRISTALOGRÁFICOS Y DIRECCIONES EN LA ESTRUCTURA CRISTALINA HEXAGONAL

3.7.1 Índices para los planos cristalinos en celdas unitarias HCP*

Los planos cristalinos en la celda unitaria HCP se identifican mediante cuatro índices en vez de tres. Los índices de los planos cristalinos HCP, llamados *índices de Miller-Bravais*, se indican por las letras *h*, *k*, *i* y *l* y van encerrados en paréntesis como (*hkil*). Estos índices hexagonales de cuatro dígitos se basan en el sistema de coordenadas de cuatro ejes, como se muestra en la figura 3.16 en la celda unitaria HCP. Hay tres ejes basales a_1, a_2, a_3, donde a_1 y a_2 forman ángulos de 120° entre sí. El cuarto eje o eje *c* es el eje vertical localizado en el centro de la celda unitaria. La unidad *a* de medida a lo largo de los ejes a_1, a_2 y a_3 es la distancia entre dos átomos localizados a lo largo de estos ejes, como se indica en la figura 3.16. La unidad de medida a lo largo del eje *c* es la altura de la celda unitaria. Los recíprocos de las intersecciones que un plano cristalino determina con los ejes a_1, a_2 y a_3, dan los índices *h*, *k* e *i*, mientras que el recíproco de la intersección con el eje *c* da el índice *l*.

*En la exposición de los planos y las direcciones se empleará la "celda mayor" para la presentación de los conceptos.

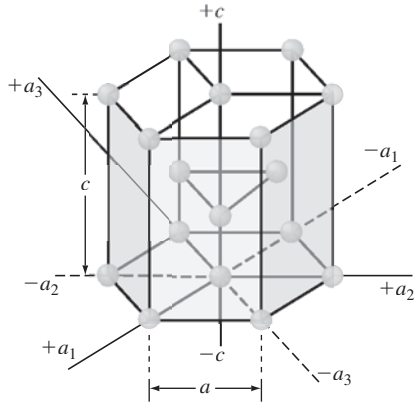
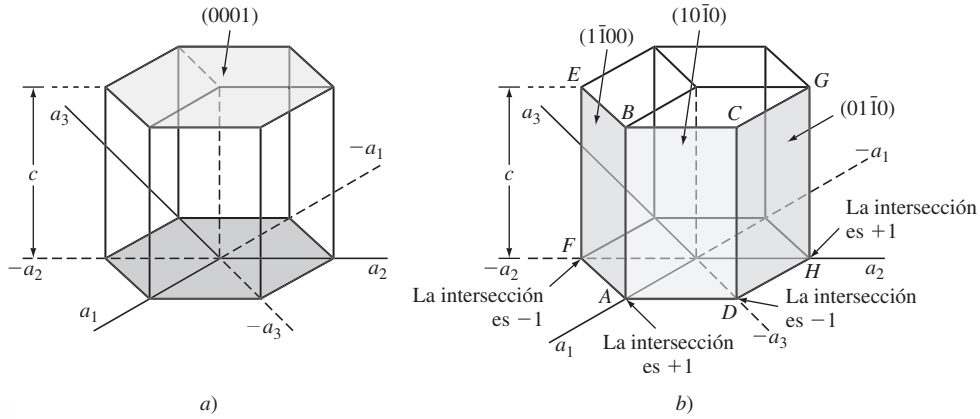


Figura 3.16
Los cuatro ejes de coordenadas (a_1, a_2, a_3 y *c*) de la celda unitaria de la estructura cristalina HCP.



Matvis

Figura 3.17
Índices de Miller-Bravais de los planos de los cristales hexagonales: *a*) planos basales y *b*) planos del prisma.

Planos basales En la celda unitaria HCP los planos basales son muy importantes para esta celda unitaria y se indican en la figura 3.17*a*. Dado que el plano basal superior en la celda unitaria HCP es paralelo a los ejes a_1, a_2 y a_3, su intersección con estos ejes será en el infinito. Así, $a_1 = \infty$, $a_2 = \infty$ y $a_3 = \infty$. El eje c, sin embargo, es unitario, ya que el plano basal superior intersecta el eje c a una distancia unidad. Tomando los recíprocos de estas intersecciones se tienen los índices de Miller-Bravais para el plano basal HCP. Así, $h = 0$, $k = 0$, $i = 0$ y $l = 1$. El plano basal HCP es, por tanto, cero-cero-cero-uno, o el plano (0001).

Planos del prisma Aplicando el mismo método, las intersecciones del plano frontal del prisma (*ABCD*) de la figura 3.17*b*, son $a_1 = +1$, $a_2 = \infty$, $a_3 = -1$ y $c = \infty$. Tomando los recíprocos de estas intersecciones, se tiene $h = 1$, $k = 0$, $i = -1$ y $l = 0$, o el plano $(10\bar{1}0)$. De forma análoga, el plano del prisma *ABEF* de la figura 3.17*b* tiene los índices $(1\bar{1}00)$ y el plano (*DCGH*) los índices $(01\bar{1}0)$. Todos los planos del prisma HCP pueden ser indicados colectivamente como la familia de planos $\{10\bar{1}0\}$.

A veces, los planos HCP son indicados solamente por tres índices (*hkl*), dado que $h + k = -i$. Sin embargo, los índices (*hkil*) se utilizan habitualmente, debido a que ponen de manifiesto el carácter hexagonal de la celda unitaria HCP.

3.7.2 Índices de dirección en las celdas unitarias HCP[5]

En las celdas unitarias HCP las direcciones se indican habitualmente por cuatro índices *u, v, t* y *w* encerrados entre corchetes como [*uvtw*]. Los índices *u, v* y *t* son

[5] El tema de los índices de dirección para las celdas unitarias hexagonales no suele presentarse en un curso introductorio de materiales, pero se incluye aquí para los estudiantes avanzados.

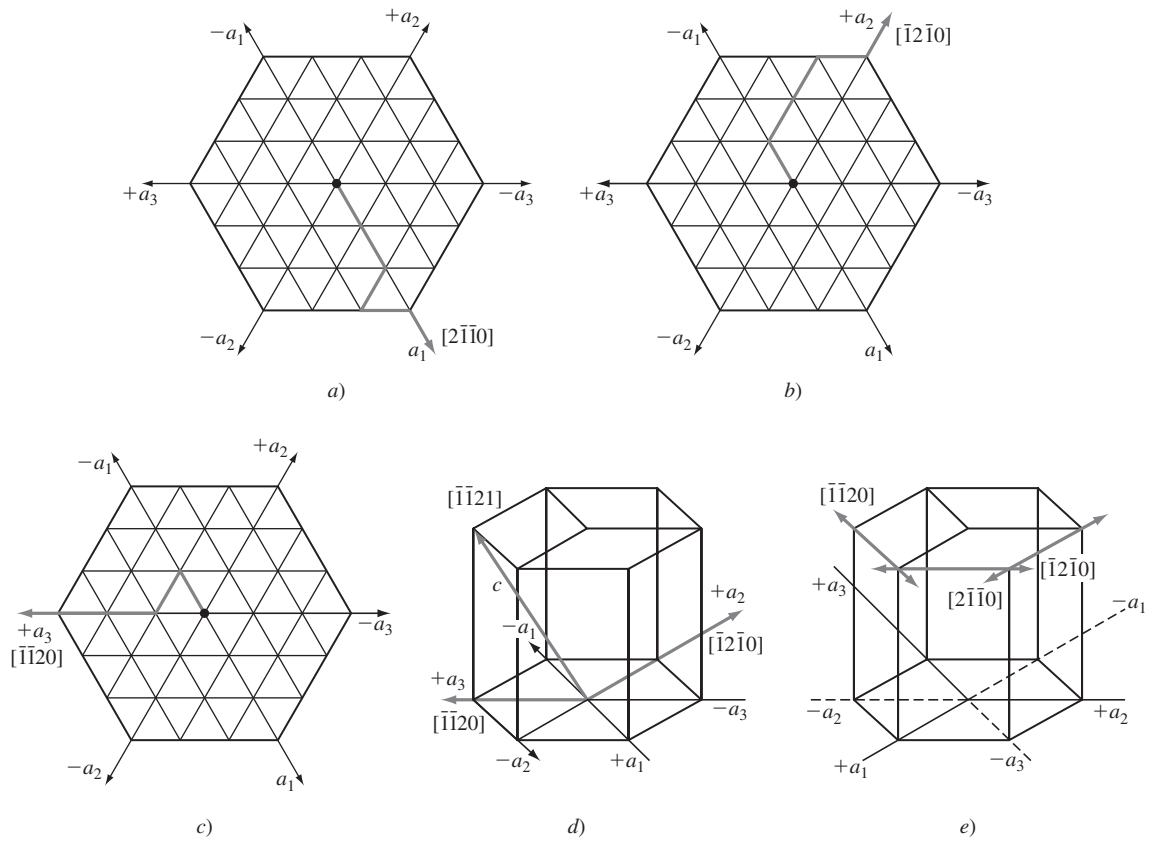


Figura 3.18
Índices de dirección de Miller-Bravais en la estructura cristalina hexagonal para las direcciones principales: *a*) dirección del eje $+a_1$ en el plano basal, *b*) dirección del eje $+a_2$ en el plano basal, *c*) dirección del eje $+a_3$ en el plano basal, *d*) dirección del eje $+a_3$ incorporando el eje *c* y *e*) las direcciones de Miller-Bravais positivas y negativas están indicadas en la estructura cristalina hexagonal sencilla en el plano basal superior.

los vectores de la red en las direcciones a_1, a_2 y a_3, respectivamente (figura 3.16), y el índice w es una red en el vector reticular en la dirección c. Para mantener la uniformidad entre las direcciones y los planos HCP se ha acordado para las direcciones que $u + v = -t$.

Determinemos ahora los índices hexagonales de Miller-Bravais para las direcciones a_1, a_2 y a_3 que son los ejes basales positivos de la celda unitaria hexagonal. Los índices de la dirección a_1 se dan en la figura 3.18*a*, los índices de la dirección a_2 en la figura 3.18*b* y los índices de la dirección a_3 en la figura 3.18*c*. Si es necesario indicar una dirección c también para la dirección a_3, esto se muestra en la figura 3.18*d*. En la figura 3.18*e* se resumen las direcciones positivas y negativas en el plano basal superior de la estructura cristalina hexagonal sencilla.

3.8 COMPARACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS CRISTALINAS FCC, HCP Y BCC

3.8.1 Estructuras cristalinas FCC y HCP

Como se ha indicado anteriormente, las estructuras cristalinas HCP y FCC son estructuras compactas. Esto es, sus átomos, que se consideran aproximadamente como "esferas", están empaquetados lo más juntos posible de forma que se alcanza un factor de empaquetamiento de 0.74.[6] El plano (111) en la estructura cristalina FCC presentado en la figura 3.19*a* tiene un orden de empaquetamiento idéntico al de los planos (0001) de la estructura cristalina HCP presentado en la figura 3.19*b*. Sin embargo, las estructuras cristalinas tridimensionales FCC y HCP no son idénticas, dado que hay una diferencia en el orden de apilamiento de los planos atómicos, que puede describirse mejor considerando el apilamiento de esferas rígidas representando a los átomos. Como analogía, se puede imaginar el apilamiento de planos de canicas de igual tamaño, unos sobre otros, minimizando el espacio entre las canicas.

Considérese primero un plano de empaquetamiento compacto de átomos designado como plano *A*, como se muestra en la figura 3.20*a*. Obsérvese que hay dos ti-

[6] Como se muestra en la sección 3.3, los átomos en la estructura HCP se desvían hacia diversos grados de idealidad. En algunos metales HCP los átomos se alargan sobre el eje *c* y en otros casos se comprimen sobre el eje *c* (ver tabla 3.4).

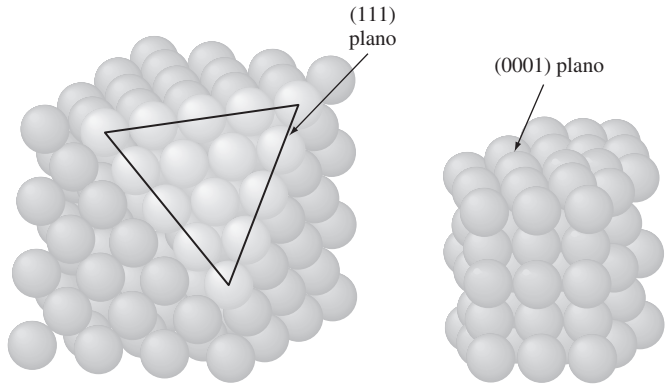


Figura 3.19
Comparación de la: *a*) estructura cristalina FCC mostrando los planos de empaquetamiento compacto (111) y *b*) estructura cristalina HCP mostrando los planos de empaquetamiento compacto (0001).
(Según W. G. Moffatt, G. W. Pearsall y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. I: "Structure", Wiley, 1964, p. 51.)

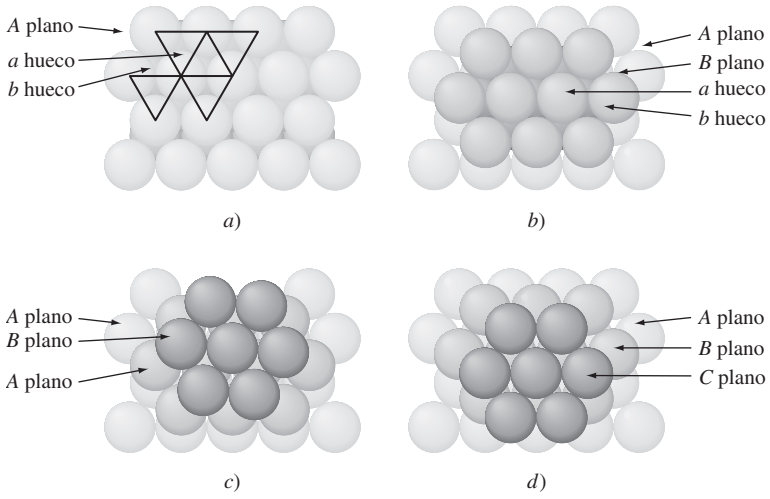


Figura 3.20
Formación de las estructuras cristalinas HCP y FCC por apilamiento de planos atómicos. *a*) Plano *A* mostrando los huecos *a* y *b*, *b*) plano *B* colocado en los huecos del plano *A*. *c*) Tercer plano colocado en los huecos *b* del plano *B*, dando un nuevo plano *C* y formando una estructura cristalina FCC.
(Adaptado de P. Ander y A. J. Sonnessa, "Principles of Chemistry", Macmillan, 1965, p. 661.)

Animación

pos diferentes de espacios vacíos o huecos entre los átomos. Los huecos que apuntan a la parte superior de la página, se designan como huecos *a* y los que apuntan a la parte inferior de la página, huecos *b*. Un segundo plano de átomos puede situarse sobre los huecos *a* o *b* y se consigue la misma estructura tridimensional. Sitúese el plano *B* sobre los huecos *a*, como se muestra en la figura 3.20*b*. Ahora, si un tercer plano de átomos se coloca sobre el plano *B* para formar una estructura compacta, es posible formar dos estructuras compactas diferentes. Una posibilidad es colocar los átomos del tercer plano en los huecos *b* del plano *B*. Así, los átomos de este tercer plano estarán directamente sobre los del plano *A* y se puede designar este plano como otro plano *A* (figura 3.20*c*). Si los planos sucesivos de átomos se colocan en este mismo orden de apilamiento, la secuencia de apilamiento de la estructura tridimensional obtenida puede ser designada por *ABABAB*.... Así, una secuencia como ésta conduce a una estructura cristalina HCP (figura 3.19*b*).

La segunda posibilidad de formar una estructura compacta es colocar el tercer plano en los huecos *a* del plano *B* (figura 3.20*d*). Este tercer plano se designa por *C*, ya que los átomos no están directamente sobre los planos *B* o *A*. La secuencia de apilamiento en esta estructura compacta se designa por *ABCABCABC*... y da lugar a la estructura FCC mostrada en la figura 3.19*a*.

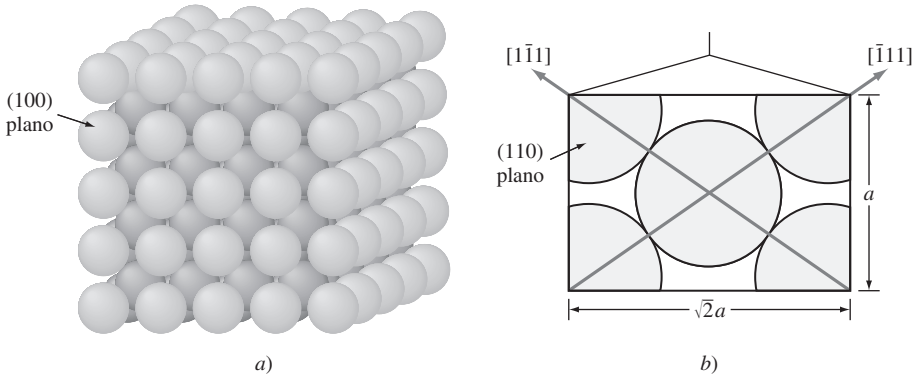


Figura 3.21
Estructura cristalina BCC mostrando: *a*) el plano (100) y *b*) una sección del plano (110). Obsérvese que no se trata de una estructura compacta pero que las diagonales son direcciones compactas.
[*a) Según W. G. Moffatt, G. W. Pearsall y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. 1: "Structure", Wiley, 1964, p. 51.*]

3.8.2 Estructura cristalina BCC

La estructura BCC no es una estructura de empaquetamiento compacto, por tanto, no presenta planos de empaquetamiento compacto como los planos {111} en la estructura FCC y los planos {0001} en la estructura HCP. Los planos más densamente empaquetados en la estructura BCC son la familia de planos {110}, de los que el plano (110) se presenta en la figura 3.21*b*. Sin embargo, los átomos de la estructura BCC tienen direcciones de empaquetamiento compacto en las diagonales del cubo, cuyas direcciones son (111).

3.9 CÁLCULOS DE LA DENSIDAD VOLUMÉTRICA, PLANAR Y LINEAL DE LAS CELDAS UNITARIAS

3.9.1 Densidad volumétrica

Aplicando el modelo de esferas rígidas para la estructura cristalina de la celda unitaria de un metal y un valor del radio atómico del metal obtenido por análisis de difracción de rayos X se obtiene un valor de la **densidad volumétrica** del metal, aplicando la ecuación

$$\text{Densidad volumétrica de un metal} = \rho_v = \frac{\text{masa/celda unitaria}}{\text{volumen/celda unitaria}} \qquad \textbf{(3.5)}$$

En el problema de ejemplo 3.11 se obtiene un valor de 8.98 Mg/m^3 (8.98 g/cm^3) para la densidad del cobre. El valor experimental tabulado para la densidad del cobre es 8.96 Mg/m^3 (8.96 g/cm^3). La densidad ligeramente inferior del valor experimental puede atribuirse a la ausencia de átomos en algunas posiciones atómicas (vacan-

tes), defectos de línea y uniones defectuosas donde se unen los granos (límites de grano). Estos defectos cristalinos se expondrán en el capítulo 4. Otra causa de la discrepancia puede deberse a que los átomos no son esferas perfectas.

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.11

El cobre tiene una estructura cristalina FCC y un radio atómico de 0.1278 nm. Considerando a los átomos como esferas rígidas que se tocan entre sí a lo largo de la diagonal de la celda unitaria FCC como se muestra en la figura 3.7, calcule el valor teórico de la densidad del cobre en megagramos por metro cúbico. La masa atómica del cobre es de 63.54 g/mol.

■ Solución

Para la celda unitaria FCC, $\sqrt{2}a = 4R$, donde a es la constante de red en la celda unitaria y R es el radio del átomo de cobre. Así,

$$a = \frac{4R}{\sqrt{2}} = \frac{(4)(0.1278\text{ nm})}{\sqrt{2}} = 0.361\text{ nm}$$

$$\text{La densidad volumétrica del cobre} = \rho_v = \frac{\text{masa/celda unitaria}}{\text{volumen/celda unitaria}} \qquad \textbf{(3.5)}$$

En la celda unitaria FCC hay cuatro átomos/celda unitaria. Cada átomo de cobre tiene una masa de (63.54 g/mol)/(6.02×10^{23} átomos/mol). Así, la masa m de los átomos de Cu en la celda unitaria es

$$m = \frac{(4\text{ átomos})(63.54\text{ g/mol})}{6.02 \times 10^{23}\text{átomos/mol}}\left(\frac{10^{-6}\text{ Mg}}{\text{g}}\right) = 4.22 \times 10^{-28}\text{ Mg}$$

El volumen V de la celda unitaria del Cu es

$$V = a^3 = \left(0.361\text{ nm} \times \frac{10^{-9}\text{ m}}{\text{nm}}\right)^3 = 4.70 \times 10^{-29}\text{ m}^3$$

Así, la densidad del cobre es

$$\rho_v = \frac{m}{V} = \frac{4.22 \times 10^{-28}\text{ Mg}}{4.70 \times 10^{-29}\text{ m}^3} = 8.98\text{ Mg/m}^3 \quad (8.98\text{ g/cm}^3) \blacktriangleleft$$

3.9.2 Densidad atómica planar

A veces, es importante determinar la densidad atómica en varios planos cristalinos. Para ello se calcula una cantidad llamada **densidad atómica planar** aplicando la relación

$$\text{Densidad atómica planar} = \rho_p = \frac{\text{Núm equivalente de átomos cortados por el área seleccionada}}{\text{área seleccionada}} \qquad \textbf{(3.6)}$$

Por conveniencia, se utiliza en estos cálculos el área de un plano que corta a una celda unitaria, como muestra, por ejemplo, la figura 3.22 para el plano (110) en una

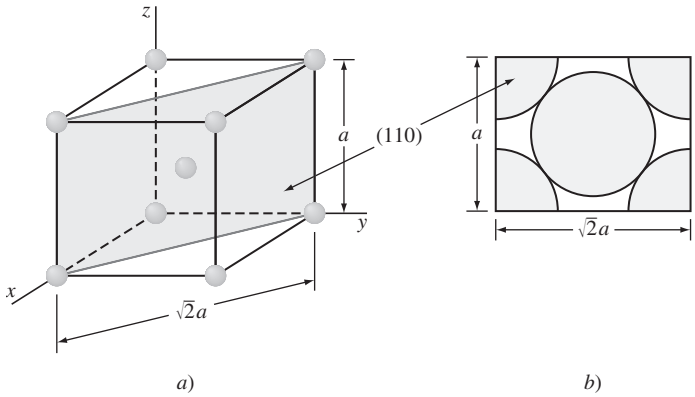


Figura 3.22
a) Celda unitaria de posiciones atómicas BCC mostrando un plano en (110) sombreado, *b*) Áreas de los átomos en la celda unitaria BCC cortadas por el plano (110).

celda unitaria BCC. Para que el área de un átomo se contabilice en este cálculo, el plano de interés debe cortar el centro del átomo. En el problema de ejemplo 3.12 el plano (110) corta el centro de cinco átomos, pero sólo se contabiliza el equivalente a dos átomos, dado que sólo una cuarta parte de cada uno de los átomos de los cuatro vértices está inclinada en el área de la celda unitaria.

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.12

Calcule la densidad atómica planar ρ_p en el plano (110) de la red BCC del hierro α en átomos por milímetro cuadrado. La constante de red del hierro α es 0.287 nm.

■ Solución

$$\rho_p = \frac{\text{número equivalente de átomos cuyos centros están cortados por el área seleccionada}}{\text{área seleccionada}} \qquad \textbf{(3.6)}$$

El número equivalente de átomos cortados por el plano (110) en términos de área dentro de la celda unitaria BCC se muestra en la figura 3.22, y es:

1 átomo en el centro + $4 \times \frac{1}{4}$ de átomo en los cuatro vértices del plano = 2 átomos

El área intersecada por el plano (110) dentro de una celda unitaria (área seleccionada) es

$$(\sqrt{2}a)(a) = \sqrt{2}a^2$$

Así, la densidad atómica planar es

$$\rho_p = \frac{2 \text{ átomos}}{\sqrt{2}(0.287 \text{ nm})^2} = \frac{17.2 \text{ átomos}}{\text{nm}^2}$$

$$= \frac{17.2 \text{ átomos}}{\text{nm}^2} \times \frac{10^{12} \text{ nm}^2}{\text{mm}^2}$$

$$= 1.72 \times 10^{13} \text{ átomos/mm}^2 \blacktriangleleft$$

3.9.3 Densidad atómica lineal

Algunas veces es importante determinar la densidad atómica de varias direcciones en las estructuras cristalinas. Para ello se calcula una magnitud llamada **densidad atómica lineal** a partir de la relación:

$$\text{Densidad atómica lineal} = \rho_l = \frac{\text{número de diámetros atómicos cortados por la longitud seleccionada de la línea en la dirección de interés}}{\text{longitud seleccionada de la línea}} \tag{3.7}$$

El problema de ejemplo 3.13 muestra cómo puede calcularse la densidad atómica lineal en la dirección [110] de la red cristalina del cobre puro.

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.13

Calcule la densidad atómica lineal ρ_l en la dirección [110] de la red cristalina de cobre en átomos por milímetro. El cobre es FCC y tiene una constante de red de 0.361 nm.

■ Solución

Los átomos cuyos centros corta la dirección [110] se muestran en la figura 3.23. Se escoge como longitud de la línea la diagonal de la cara de la celda FCC, que es $\sqrt{2}a$. El número de diámetros atómicos cortados por esta línea es un $\frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2} = 2$ átomos. Aplicando la ecuación 3.7, la densidad atómica lineal es

$$\rho_l = \frac{2 \text{ átomos}}{\sqrt{2}a} = \frac{2 \text{ átomos}}{\sqrt{2}(0.361 \text{ nm})} = \frac{3.92 \text{ átomos}}{\text{nm}}$$

$$= \frac{3.92 \text{ átomos}}{\text{nm}} \times \frac{10^6 \text{ nm}}{\text{mm}}$$

$$= 3.92 \times 10^6 \text{ átomos/mm} \blacktriangleleft$$

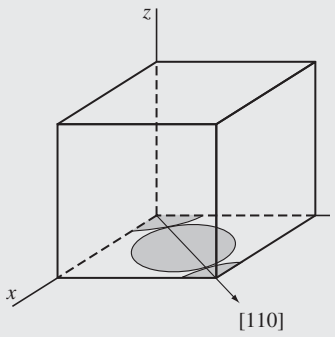


Figura 3.23
Diagrama para calcular la densidad atómica lineal en la dirección [110] en una celda unitaria FCC.

3.10 POLIMORFISMO O ALOTROPÍA

Muchos elementos y compuestos existen en más de una forma cristalina en diferentes condiciones de temperatura y presión. Este fenómeno se llama **polimorfismo** o *alotropía*. Muchos metales de importancia industrial como el hierro, titanio y cobalto sufren transformaciones alotrópicas a temperaturas elevadas a presión atmosférica. La tabla 3.5 recoge algunos metales seleccionados que presentan transformaciones alotrópicas y muestra los cambios de estructura que tienen lugar.

El hierro se presenta en estructuras cristalina BCC y FCC en el rango de temperatura que va desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de fusión a 1 539°C, que se muestra en la figura 3.24. El hierro alfa (α) existe desde -273 hasta 912°C y tiene una estructura cristalina BCC. El hierro gamma (γ) existe desde

Tabla 3.5 Formas cristalinas alotrópicas de algunos metales

Metal	Estructura cristalina a temperatura ambiente	A otras temperaturas
Ca	FCC	BCC ($>$ 447°C)
Co	HCP	FCC ($>$ 427°C)
Hf	HCP	BCC ($>$ 1 742°C)
Fe	BCC	FCC (912−1 394°C)
		BCC ($>$ 1 394°C
Li	BCC	HCP ($<$ −193°C)
Na	BCC	HCP ($<$ −233°C)
Tl	HCP	BCC ($>$ 294°C
Ti	HCP	BCC ($>$ 883°C
Y	HCP	BCC ($>$ 1 481°C)
Zr	HCP	BCC ($>$ 872°C)

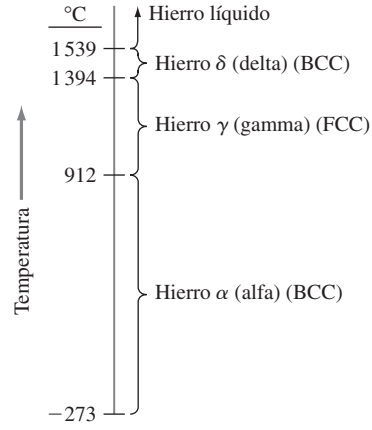


Figura 3.24
Formas cristalinas alotrópicas del hierro entre distintos rangos de temperatura a presión atmosférica.

912 hasta 1 394°C y tiene una estructura cristalina FCC. El hierro delta (δ) existe desde 1 394 hasta 1 539°C, que es la temperatura de fusión del hierro. La estructura cristalina del hierro δ es también BCC pero con una constante de red mayor que la del hierro α.

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.14

Calcule el cambio de volumen teórico que acompaña a la transformación alotrópica en un metal puro desde la estructura FCC a BCC. Considere el modelo de esferas rígidas y que no existe cambio de volumen atómico antes y después de la transformación.

■ Solución

En la celda unitaria de la estructura cristalina FCC, los átomos están en contacto entre sí en la diagonal de las caras, como se muestra en la figura 3.7. De este modo:

$$\sqrt{2}a = 4R \quad \text{o} \quad a = \frac{4R}{\sqrt{2}} \tag{3.3}$$

En la celda unitaria de la estructura cristalina BCC, los átomos están en contacto a lo largo de la diagonal del cubo, como se muestra en la figura 3.5. De este modo:

$$\sqrt{3}a = 4R \quad \text{o} \quad a = \frac{4R}{\sqrt{3}} \tag{3.1}$$

El volumen por átomo de la estructura cristalina FCC, dado que se tienen cuatro átomos en la celda unitaria, es

$$V_{\text{FCC}} = \frac{a^3}{4} = \left(\frac{4R}{\sqrt{2}}\right)^3\left(\frac{1}{4}\right) = 5.66R^3$$

El volumen por átomo de la estructura cristalina BCC, dado que se tienen dos átomos en la celda unitaria, es

$$V_{\text{BCC}} = \frac{a^3}{2} = \left(\frac{4R}{\sqrt{3}}\right)^3\left(\frac{1}{2}\right) = 6.16R^3$$

El cambio de volumen asociado a la transformación de la estructura cristalina FCC a BCC, asumiendo que no existe cambio en el radio atómico, es

$$\frac{\Delta V}{V_{\text{FCC}}} = \frac{V_{\text{BCC}} - V_{\text{FCC}}}{V_{\text{FCC}}}$$

$$= \left(\frac{6.16R^3 - 5.66R^3}{5.66R^3}\right)100\% = +8.8\% \blacktriangleleft$$

3.11 ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS CRISTALINAS

El conocimiento actual de las estructuras cristalinas se ha obtenido principalmente por la técnica de difracción de rayos X que utiliza radiación de aproximadamente la misma longitud de onda que la distancia entre los planos de la red cristalina. Sin

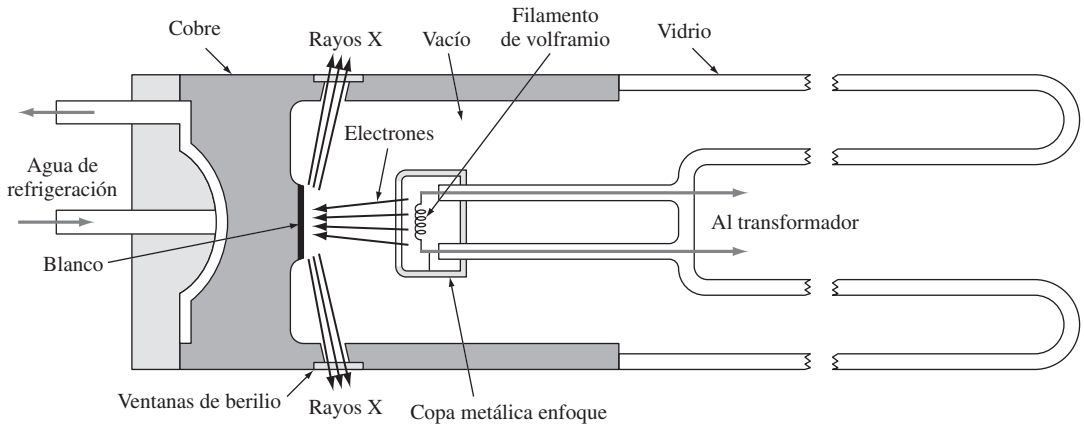


Figura 3.25
Diagrama esquemático de la sección transversal de un tubo de rayos X de filamento sellado.
(Según B. D. Cullity, "Elements of X-Ray Diffraction", 2a. ed., Addison-Wesley, 1978, p. 23.)

embargo, antes de exponer de qué forma los rayos X son difractados por los cristales, se debe considerar cómo se obtienen los rayos X para aplicaciones experimentales.

3.11.1 Fuentes de rayos X

Los rayos X utilizados en la difracción son radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda entre 0.05 a 0.25 nm (0.5 a 2.5 Å). Para poder comparar, la longitud de onda de la luz visible es del orden de 600 nm (6 000 Å). Para producir rayos X para fines de difracción, se debe aplicar un voltaje de unos 35 kV entre un cátodo y un ánodo metálicos, ambos en el vacío, como se presenta en la figura 3.25. Cuando el filamento del cátodo de volframio se calienta, se liberan electrones por emisión termoiónica y se aceleran a través del vacío debido a la gran diferencia de voltaje entre el cátodo y el ánodo aumentando su energía cinética. Cuando los electrones golpean al metal blanco (por ejemplo, molibdeno) se emiten rayos X. Sin embargo, la mayor parte de la energía cinética (aproximadamente 98%) se convierte en calor, por lo que el metal blanco debe refrigerarse externamente.

En la figura 3.26 se presenta el espectro de rayos X emitido a 35 kV por medio de un blanco de molibdeno. El espectro muestra una radiación continua de rayos X en un intervalo de longitudes de onda desde 0.2 a 1.4 Å (0.02 a 0.14 nm) y dos picos de radiación característica que se designan por línea K_α y K_β. Las longitudes de onda K_α y K_β son características de este elemento. Para el molibdeno, la línea K_α tiene lugar a una longitud de aproximadamente 0.7 Å (0.07 nm). El origen de la radiación característica puede explicarse de la siguiente manera: primero, los electrones K (electrones en el nivel $n = 1$) son expulsados del átomo por bombardeo del blanco con electrones de alta energía, dejando a los átomos excitados. Después, algunos electrones de niveles superiores (como $n = 2$ o 3) caen a niveles de energía inferiores reemplazando a los electrones K perdidos, emitiendo energía de una longitud de onda característica. La transición de electrones del nivel L ($n = 2$)

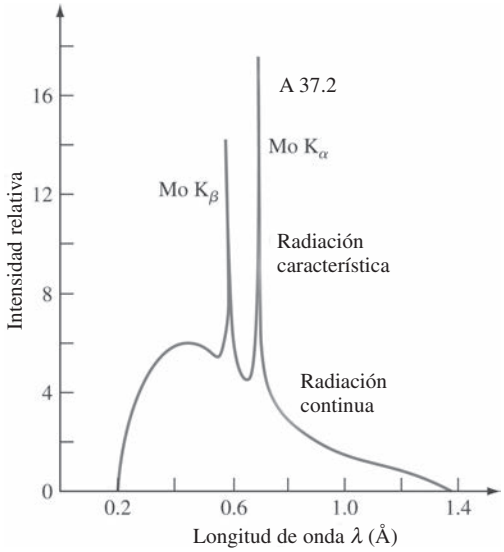


Figura 3.26
Espectro de emisión de rayos X producidos cuando el molibdeno metálico es utilizado como blanco en un tubo de rayos X operando a 35 kV.

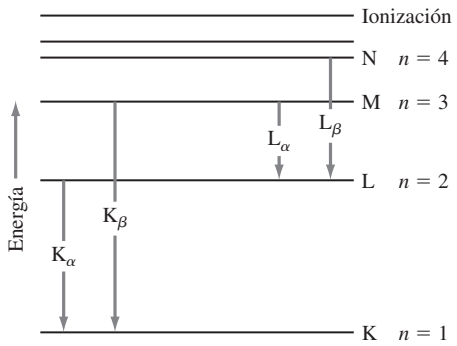


Figura 3.27
Niveles de energía de electrones en el molibdeno mostrando el origen de las radiaciones K_α y K_β.

al nivel K ($n = 1$) da lugar a una energía de longitud de onda de la línea K_α como se indica en la figura 3.27.

3.11.2 Difracción de rayos X

Dado que las longitudes de onda de algunos rayos X son aproximadamente iguales a la distancia entre planos de los átomos en los sólidos cristalinos, pueden generarse picos de difracción reforzados de intensidad variable que pueden producirse cuando un haz de rayos X choca con un sólido cristalino. Sin embargo, antes de considerar la aplicación de las técnicas de difracción de rayos X al análisis de las estructuras cristalinas, deben examinarse las condiciones geométricas necesarias para que se produzcan rayos difractados o reforzados de los rayos X reflejados.

Considérese un haz de rayos X monocromático (una sola longitud de onda) que incide en un cristal, como se muestra en la figura 3.28. Para simplificar, se sustituyen los planos cristalinos de los centros atómicos de dispersión por los planos cristalinos que actúan como espejos reflejando el haz incidente de rayos X. En la figura 3.28 las líneas horizontales representan un conjunto de planos cristalinos paralelos con índices de Miller (*hkl*). Cuando un haz de rayos X monocromático de longitud de onda λ incide en este conjunto de planos con un ángulo tal que las trayectorias de las ondas que abandonan los diferentes planos *no están en fase*, *no se producirá reforzamiento del haz* (figura 3.28*a*). Así, tiene lugar una interferencia destructiva. Si las trayectorias de las ondas reflejadas por los diferentes planos están en fase, tiene lugar un reforzamiento del haz o bien se da una interferencia constructiva (figura 3.28*b*).

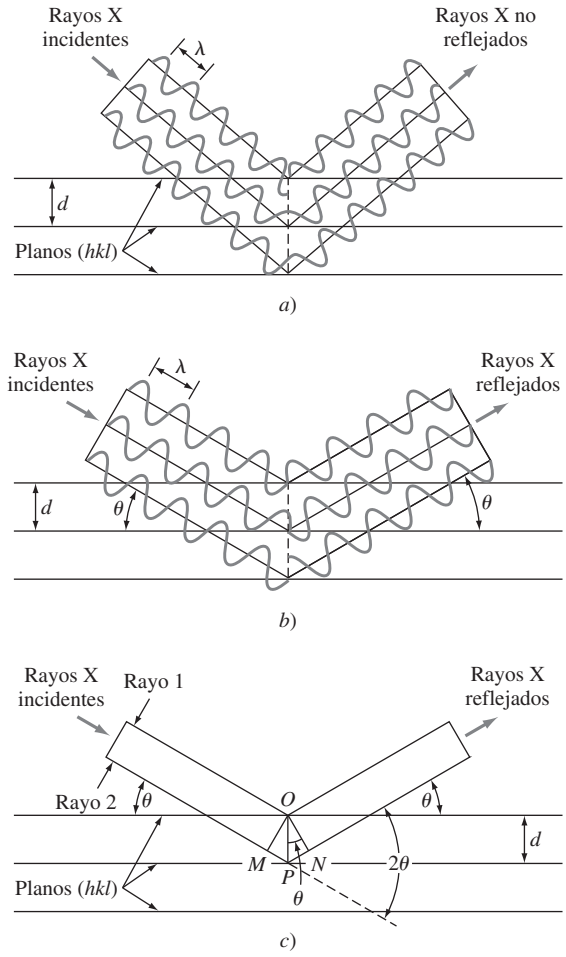


Figura 3.28
Reflexión de un haz de rayos X por los planos (*hkl*) de un cristal. *a*) El haz no reflejado se produce como un ángulo de incidencia arbitrario. *b*) En el ángulo de Bragg θ los rayos reflejados están en fase y se refuerzan entre ellos. *c*) Análogo al *b*) excepto en que se ha omitido la representación de la onda.
(Según A. G. Guy y J. J. Hren, "Elements of Physical Metallurgy", 3a. ed., Addison-Wesley, 1974, p. 201.)

Considérense ahora los rayos X incidentes 1 y 2 como se indica en la figura 3.28*c*. Para que estos rayos estén en fase, la distancia adicional recorrida por el rayo 2 que es igual a $MP + PN$, debe ser igual a un número entero de longitudes de onda λ. Así,

$$n\lambda = MP + PN \qquad \textbf{(3.8)}$$

donde $n = 1, 2, 3, \ldots$ y se llama *orden de difracción*. Dado que *MP* y *PN* son equivalentes a d_{hkl} sen θ, donde d_{hkl} es el espaciado interplanar o distancia entre los planos del cristal de índices (*hkl*), la condición para una interferencia constructiva (por ejemplo, la producción de un pico de difracción de radiación intensa) debe ser

$$n\lambda = 2d_{hkl}\,\text{sen}\,\theta \tag{3.9}$$

Esta ecuación, conocida como *la ley de Bragg*,[7] da la relación entre las posiciones angulares de los haces difractados reforzados en función de la longitud de onda λ de la radiación de rayos X incidente y del espaciado interplanar d_{hkl} de los planos cristalinos. En muchos casos se utiliza el primer orden de difracción, donde $n = 1$, y en este caso la ley de Bragg resulta

$$\lambda = 2d_{hkl}\,\text{sen}\,\theta \tag{3.10}$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.15

Una muestra de hierro BCC se coloca en un difractómetro de rayos X utilizando rayos X incidentes de longitud de onda de $l = 0.1541$ nm. La difracción a partir de los planos {110} se obtiene a $2\theta = 44.704°$. Calcule el valor de la constante de red a para el hierro BCC. (Suponga un orden de difracción de $n = 1$.)

■ Solución

$$2\theta = 44.704° \qquad \theta = 22.35°$$

$$\lambda = 2d_{hkl}\,\text{sen}\,\theta$$

$$d_{110} = \frac{\lambda}{2\,\text{sen}\,\theta} = \frac{0.1541\text{ nm}}{2(\text{sen }22.35°)} \tag{3.10}$$

$$= \frac{0.1541\text{ nm}}{2(0.3803)} = 0.2026\text{ nm}$$

Reordenando la ecuación 3.4, se obtiene

$$a = d_{hkl}\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

Así,

$$a(\text{Fe}) = d_{110}\sqrt{1^2 + 1^2 + 0^2}$$

$$= (0.2026\text{ nm})(1.414) = 0.287\text{ nm} \blacktriangleleft$$

3.11.3 Análisis por difracción de rayos X de las estructuras cristalinas

Método de análisis de polvo por difracción de rayos X La técnica más comúnmente utilizada en difracción de rayos X es el *método de polvo*. En esta técnica se utiliza una muestra pulverizada de muchos cristales para que tenga lugar una orientación al azar y asegurar que algunas partículas estarán orientadas en el haz de ra-

[7] William Henry Bragg (1862-1942). Físico inglés que trabajó en cristalografía mediante el uso de rayos X.

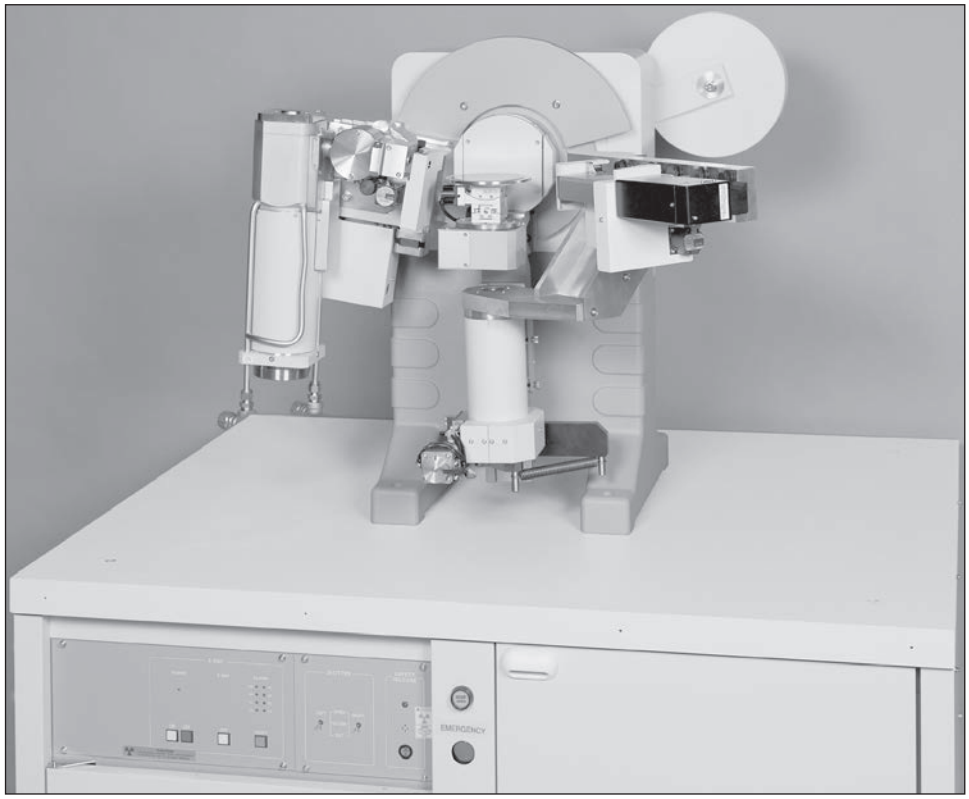


Figura 3.29
Un difractómetro de rayos X, al que se le han retirado los escudos contra la radiación X.
(Cortesía de Rigaku.)

yos X para que cumplan las condiciones de difracción de la ley de Bragg. En los análisis modernos de cristales se utiliza un difractómetro de rayos X que tiene un contador de radiación que detecta el ángulo y la intensidad del haz difractado (figura 3.29). Un registro se encarga de graficar automáticamente la intensidad del haz difractado mientras el contador se desplaza por un goniómetro[8] circular (figura 3.30) que está sincronizado con la muestra en un intervalo de valores 2θ. En la figura 3.31 se muestra una gráfica de la intensidad del haz de rayos X difractado en función de los ángulos de difracción 2θ para una muestra en polvo de un metal puro. De esta forma, los ángulos de los haces difractados y sus intensidades pueden ser registrados simultáneamente. Algunas veces se utiliza una cámara de polvo con un rollo de película incorporado en vez del difractómetro, pero este método es mucho más lento y en la mayoría de los casos, menos conveniente.

Condiciones de difracción para celdas unitarias cúbicas Las técnicas de difracción de rayos X permiten determinar las estructuras de los sólidos cristalinos. La in-

[8] Un goniómetro es un instrumento para medir ángulos.

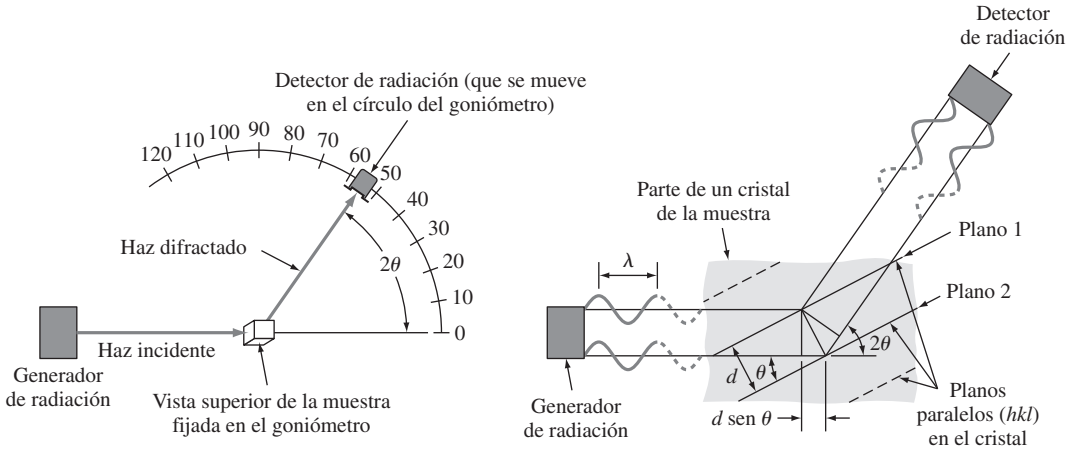


Figura 3.30
Esquema del método difractométrico del análisis de los cristales y de las condiciones necesarias para la difracción.
(Según A. G. Guy, "Essentials of Materials Science", McGraw-Hill, 1976.)

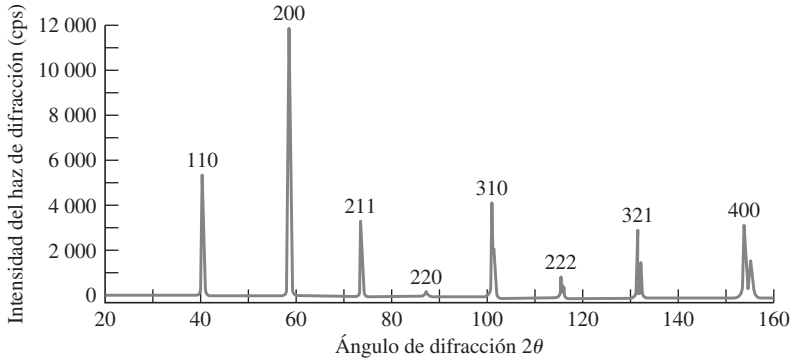


Figura 3.31
Registro de los ángulos de difracción para una muestra de volframio obtenido utilizando un difractómetro con radiación de cobre.
(Según A. G. Guy y J. J. Hren, "Elements of Physical Metallurgy", 3a. ed., Addison-Wesley, 1974, p. 208.)

terpretación de los resultados de difracción de rayos X es compleja para la mayoría de las sustancias cristalinas y sobrepasa el propósito de este libro, por ello sólo se considerará el caso sencillo de la difracción de un metal puro cúbico. Los datos de los análisis de rayos X por difracción de las celdas unitarias cúbicas pueden simplificarse combinando la ecuación 3.4,

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

con la ecuación de la ley de Bragg $\lambda = 2d \operatorname{sen}\theta$, dando

$$\lambda = \frac{2a \operatorname{sen}\theta}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \tag{3.11}$$

Esta ecuación puede emplearse junto con los datos de difracción de rayos X para determinar si una estructura es cúbica centrada en el cuerpo o en las caras. A continuación se describe cómo hacerlo.

Para emplear la ecuación 3.11 para difracción de rayos X deberá conocerse cuáles planos cristalinos son planos de difracción para cada tipo de estructura cristalina. Para la red cúbica sencilla, todos los planos (*hkl*) son planos de reflexión. Sin embargo, para la estructura BCC la difracción tiene lugar sólo en los planos cuyos índices de Miller sumados $(h + k + l)$ dan un número par (tabla 3.6). Así, para la estructura cristalina BCC los planos de difracción principales son {110}, {200}, {211}, etc., que están ordenados en la tabla 3.7. En el caso de la estructura cristalina FCC, los principales planos de difracción son los que sus índices de Miller son todos pares o todos impares (el cero se considera par). Así, para la estructura cristalina FCC, los planos de difracción son {111}, {200}, {220}, etc., como se presentan en la tabla 3.7.

Interpretación de resultados experimentales de difracción de rayos X para metales con estructuras cristalinas cúbicas Se pueden emplear los resultados experimentales de difracción de rayos X para determinar estructuras cristalinas. Un caso

Tabla 3.6 Reglas para determinar los planos de difracción {*hkl*} en los cristales cúbicos

Redes de Bravais	Reflexiones presentes	Reflexiones ausentes
BCC	$(h + k + l) =$ par	$(h + k + l) =$ impar
FCC	(h, k, l) todos pares o todos impares	(h, k, l) no todos pares ni todos impares

Tabla 3.7 Índices de Miller de los planos de difracción para las redes BCC y FCC

Planos del cubo {*hkl*}	$h^2 + k^2 + l^2$	Suma $\Sigma[h^2 + k^2 + l^2]$	Planos de difracción del cubo {*hkl*}	
			FCC	BCC
{100}	$1^2 + 0^2 + 0^2$	1		
{110}	$1^2 + 1^2 + 0^2$	2	...	110
{111}	$1^2 + 1^2 + 1^2$	3	111	
{200}	$2^2 + 0^2 + 0^2$	4	200	200
{210}	$2^2 + 1^2 + 0^2$	5		
{211}	$2^2 + 1^2 + 1^2$	6	...	211
...		7		
{220}	$2^2 + 2^2 + 0^2$	8	220	220
{221}	$2^2 + 2^2 + 1^2$	9		
{310}	$3^2 + 1^2 + 0^2$	10	...	310

sencillo que permite ilustrar cómo se puede emplear este análisis es diferenciar entre las estructuras cristalinas BCC y FCC de un metal cúbico. Supóngase que se tiene un metal con una estructura cristalina BCC o FCC y que se pueden identificar los planos de difracción principales y los valores de 2θ correspondientes, como se indica para el volframio metal en la figura 3.3.

Elevando al cuadrado ambos miembros de la ecuación 3.11 y despejando $\text{sen}^2\theta$, se obtiene

$$\text{sen}^2\theta = \frac{\lambda^2(h^2 + k^2 + l^2)}{4a^2} \tag{3.12}$$

A partir de los resultados experimentales de difracción de rayos X se pueden obtener los valores de 2θ para una serie de planos principales de difracción $\{hkl\}$. Dado que la longitud de onda de la radiación incidente y la constante de red a son constantes, se pueden eliminar estos valores a partir de la relación de dos valores de $\text{sen}^2\theta$

$$\frac{\text{sen}^2\theta_A}{\text{sen}^2\theta_B} = \frac{h_A^2 + k_A^2 + l_A^2}{h_B^2 + k_B^2 + l_B^2} \tag{3.13}$$

donde θ_A y θ_B son los dos ángulos de difracción asociados a los planos principales $\{h_Ak_Al_A\}$ y $\{h_Bk_Bl_B\}$, respectivamente.

Aplicando la ecuación 3.13 y los índices de Miller en las primeras series de planos principales enumerados en la tabla 3.7 para las estructuras BCC y FCC, se pueden determinar los valores de $\text{sen}^2\theta$ para ambas estructuras.

Para la estructura cristalina BCC las dos primeras series de los planos de difracción son los planos {110} y {200} (tabla 3.7). Sustituyendo los índices de Miller $\{hkl\}$ de estos planos en la ecuación 3.13, se obtiene

$$\frac{\text{sen}^2\theta_A}{\text{sen}^2\theta_B} = \frac{1^2 + 1^2 + 0^2}{2^2 + 0^2 + 0^2} = 0.5 \tag{3.14}$$

Así, si la estructura cristalina de un metal cúbico desconocido es BCC, la relación de los valores de $\text{sen}^2\theta$ que corresponden a los primeros planos de difracción será 0.5.

Para la estructura cristalina FCC las dos primeras series de planos de difracción son planos {111} y {200} (tabla 3.7). Sustituyendo los índices de Miller $\{hkl\}$ de estos planos en la ecuación 3.13, se obtiene

$$\frac{\text{sen}^2\theta_A}{\text{sen}^2\theta_B} = \frac{1^2 + 1^2 + 1^2}{2^2 + 0^2 + 0^2} = 0.75 \tag{3.15}$$

Así, si la estructura cristalina de un metal cúbico desconocido es FCC, la relación de los valores de $\text{sen}^2\theta$ que corresponden a los dos primeros planos de difracción, será 0.75.

El problema de ejemplo 3.16 utiliza la ecuación 3.13 y los resultados experimentales de difracción de rayos X para valores de 2θ para los planos principales de difracción para determinar si la estructura de un metal cúbico desconocido es BCC o FCC. El análisis por difracción de rayos X es generalmente mucho más complicado que el problema de ejemplo 3.16, pero los principios utilizados son los mismos. El análisis de difracción de rayos X, tanto teórico como experimental, ha sido y es utilizado para la determinación de las estructuras cristalinas de los materiales.

PROBLEMA DE EJEMPLO 3.16

El difractograma de un elemento que tiene estructura cúbica BCC o FCC presenta picos de difracción en los ángulos 2θ siguientes: 40, 58, 73, 86.8, 100.4 y 114.7. La longitud de onda de los rayos X incidentes utilizados es de 0.154 nm.

a) Determine la estructura cúbica del elemento.
b) Determine la constante de red del elemento.
c) Identifique al elemento.

Solución

a) *Determinación de la estructura cristalina del elemento*. Primero se calculan los valores de $\text{sen}^2\theta$ a partir de los valores de 2θ de los ángulos de difracción.

2θ (grado)	θ (grado)	sen θ	$\text{sen}^2\theta$
40	20	0.3420	0.1170
58	29	0.4848	0.2350
73	36.5	0.5948	0.3538
86.8	43.4	0.6871	0.4721
100.4	50.2	0.7683	0.5903
114.7	57.35	0.8420	0.7090

A continuación se calcula la relación entre los valores de $\text{sen}^2\theta$ de los ángulos primero y segundo:

$$\frac{\text{sen}^2\,\theta}{\text{sen}^2\,\theta} = \frac{0.117}{0.235} = 0.498 \approx 0.5$$

La estructura cristalina es BCC ya que la relación es de ≈ 0.5. Si la relación hubiera sido ≈ 0.75, la estructura sería FCC.

b) *Determinación de la constante de red*. Reordenando la ecuación 3.12 y despejando a^2, se obtiene

$$a^2 = \frac{\lambda^2}{4}\frac{h^2 + k^2 + l^2}{\text{sen}^2\,\theta} \tag{3.16}$$

o

$$a = \frac{\lambda}{2}\sqrt{\frac{h^2 + k^2 + l^2}{\text{sen}^2\,\theta}} \tag{3.17}$$

Sustituyendo $h = 1$, $k = 1$ y $l = 0$ en la ecuación 3.17 para los índices de Miller h, k, l de la primera serie de planos principales de difracción para la estructura BCC, que son los planos {110}, el valor correspondiente a $\text{sen}^2\theta$ es 0.117, y para una radiación incidente de λ, 0.154 nm, se obtiene

$$a = \frac{0.154\text{ nm}}{2}\sqrt{\frac{1^2 + 1^2 + 0^2}{0.117}} = 0.318\text{ nm} \blacktriangleleft$$

c) *Identificación del elemento*. El elemento es el volframio, dado que elemento tiene una constante de red de 0.316 nm y es BCC.

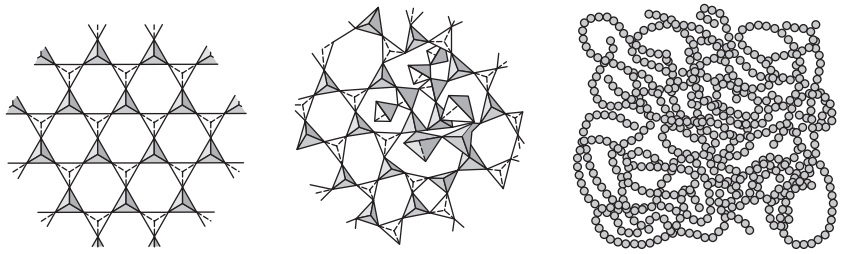
3.12 MATERIALES AMORFOS

Como se expuso anteriormente, algunos materiales se denominan amorfos o no cristalinos porque carecen de ordenamiento de largo alcance en su estructura atómica. Debe subrayarse que, en general, los materiales tienen una tendencia a alcanzar un estado cristalino debido a que es el estado más estable y corresponde al menor nivel de energía. Sin embargo, los átomos de los materiales amorfos están enlazados de manera desordenada debido a factores que inhiben la formación de un ordenamiento periódico. Los átomos de los materiales amorfos, por tanto, ocupan posiciones espaciales aleatorias, a diferencia de las posiciones específicas en los sólidos cristalinos. Para mayor claridad, en la figura 3.32 se muestran diversos grados de orden (o desorden).

Los polímeros, vidrios y algunos metales, en su mayoría son miembros de la clase de materiales amorfos. En polímeros, los enlaces secundarios entre las moléculas no permiten la formación de cadenas paralelas y muy empaquetadas durante la solidificación. Como resultado de ello, los polímeros, como el cloruro de polivinilo, constan de cadenas moleculares largas y torcidas que se entrelazan para formar un sólido de estructura amorfa, similar al de la figura 3.32*c*. En algunos polímeros, como el polietileno, las moléculas están empaquetadas más eficaz y estrechamente en algunas regiones del material para producir un mayor grado de ordenamiento a gran distancia en determinadas regiones. Como resultado de ello, estos polímeros suelen clasificarse como *semicristalinos*. En el capítulo 10 se hará una exposición más detallada de los polímeros semicristalinos.

El vidrio inorgánico basado en óxidos que forman vidrios, sílice (SiO_2), se caracteriza en general como material cerámico (vidrio cerámico) y es otro ejemplo de un material con estructura amorfa. En este tipo de vidrio, la subunidad fundamental en las moléculas es el tetraedro de SiO_4^{4-}. En la figura 3.32*a* se muestra la estructura cristalina ideal de este vidrio. El esquema muestra los tetraedros Si–O unidos vértice a vértice para formar un ordenamiento de largo alcance. En su estado líquido y viscoso, las moléculas tienen una movilidad limitada y en general la cristalización ocurre lentamente. Por tanto, una velocidad de enfriamiento modesta suprime la formación de la estructura cristalina y, en lugar de ello, los tetraedros se unen vértice con vértice para formar una red que carece de ordenamiento de largo alcance (figura 3.32*b*).

Además de los polímeros y los vidrios, algunos metales tienen también la capacidad para formar estructuras amorfas (*vidrio metálico*) en condiciones estrictas y a menudo difíciles de cumplir. A diferencia de los vidrios, los metales contienen blo-



a) *b*) *c*)

Figura 3.32
Esquema que muestra diversos grados de orden en los materiales: *a*) orden de largo alcance en sílice cristalino, *b*) vidrio de sílice sin orden de largo alcance y *c*) estructura amorfa en los polímeros.

ques móviles muy pequeños cuando están fundidos. Como resultado de ello, es difícil impedir que los metales cristalicen. Sin embargo, aleaciones como una de 78%-Fe-9% Si-13% B, que contienen un alto porcentaje de semimetales, Si y B, pueden formar vidrios metálicos por medio de la solidificación rápida a velocidades de enfriamiento mayores de 10^{8}°C/s. A velocidades de enfriamiento tan altas, los átomos sencillamente no tienen tiempo suficiente para formar una estructura cristalina y en lugar de ello forman un metal con estructura amorfa, esto es, están muy desordenados. En teoría, cualquier material cristalino puede formar una estructura no cristalina si se solidifica con suficiente rapidez desde un estado fundido.

Los materiales amorfos, debido a su estructura, tienen propiedades superiores. Por ejemplo, en comparación con sus similares cristalinos, los vidrios metálicos tienen mayor resistencia, mejores características de corrosión y propiedades magnéticas. Finalmente, es importante mencionar que los materiales amorfos no muestran patrones definidos de difracción al analizarlos con técnicas de difracción de rayos X. Esto se debe a la falta de orden y periodicidad de la estructura atómica. En los capítulos siguientes, se explicará con detalle el papel que tiene la estructura del material en sus propiedades.

3.13 RESUMEN

La distribución atómica en los sólidos cristalinos puede describirse como una red de líneas llamada *red cristalina*. Cada red cristalina puede describirse especificando la posición de los átomos en una *celda unitaria* que se repite. La estructura del cristal consiste en una red cristalina y un *patrón* o *base*. Los materiales cristalinos poseen un amplio rango de orden atómico como en la mayoría de los metales. Pero algunos materiales tales como muchos polímeros y vidrios poseen únicamente un orden de corto alcance. A tales materiales se les llama semicristalinos o amorfos. Existen siete sistemas cristalinos que se basan en la geometría de las longitudes axiales y ángulos interaxiales de la celda unitaria. Los siete sistemas tienen un total de 14 subceldas (celdas unitarias) basadas en las distribuciones internas de los átomos dentro de la celda unitaria.

Las celdas unitarias de las estructuras cristalinas más comunes en los metales son: *cúbico centrado en el cuerpo* (BCC), *cúbico centrado en la cara* (FCC), y *hexagonal compacto* (HCP) (que es una variedad compacta de la estructura hexagonal sencilla).

Las *direcciones cristalinas* en los cristales cúbicos son los componentes del vector de dirección proyectados sobre cada uno de los componentes axiales y reducidos a mínimos enteros. Se indican por [*uvw*]. Las familias de direcciones se indican por los índices de dirección encerrados en paréntesis señalados como ⟨*uvw*⟩. Los *planos cristalinos* en los cristales cúbicos se indican por los recíprocos de las intersecciones axiales del plano (seguidos por la eliminación de fracciones) como (*hkl*). Los planos de los cristales cúbicos de una forma (familia) se encierran en llaves {*hkl*}. En los cristales hexagonales, los planos cristalinos se indican generalmente con cuatro índices *h*, *k*, *i* y *l* encerrados en paréntesis (*hkil*). Estos índices son los recíprocos de la intersección del plano con los ejes a_1, a_2, a_3 y *c* de la estructura cristalina hexagonal. Las direcciones cristalinas en los cristales hexagonales son los componentes del vector de dirección proyectados sobre cada uno de los cuatro ejes coordenados y reducidos a mínimos enteros como [*uvtw*].

Utilizando el modelo de esferas rígidas se pueden realizar cálculos de la densidad lineal, planar y volumétrica de la celda unitaria. Los planos en que los átomos están empaquetados tan densamente como es posible se llaman *planos compactos*, y las direcciones en que los átomos están en contacto entre sí se llaman *direcciones compactas*. El factor de empaquetamiento para diferentes estructuras cristalinas puede determinarse asumiendo el mo-

delo atómico de esferas rígidas. Algunos metales tienen estructuras cristalinas diferentes a diferentes intervalos de temperaturas y presiones, un fenómeno llamado *polimorfismo*.

Las estructuras cristalinas de los sólidos cristalinos pueden determinarse utilizando las técnicas de análisis de difracción de rayos X. Los rayos X son difractados por los cristales cuando se cumplen las condiciones de la *ley de Bragg* ($n\lambda = 2d$ sen θ). Utilizando el difractómetro de rayos X y el *método de polvos* se puede determinar la estructura cristalina de muchos sólidos cristalinos.

3.14 DEFINICIONES

Sección 3.1

Amorfo: que carece de tipo atómico de gran alcance.

Cristalino: sólido formado por átomos, iones o moléculas ordenadas según un patrón que se repite en las tres dimensiones.

Estructura cristalina: modelo regular tridimensional de átomos, iones o moléculas en el espacio.

Red cristalina: distribución tridimensional de puntos en que cada uno de ellos tiene un entorno idéntico.

Punto reticular: un punto en una distribución en que todos los puntos tienen un entorno idéntico.

Celda unitaria: una unidad de celda en el espacio que se repite. Las longitudes axiales y los ángulos axiales son las constantes de red de la celda unitaria.

Patrón: un grupo de átomos organizados en relación de unos con otros y asociados con puntos correspondientes de la red.

Sección 3.3

Celda unitaria cúbica centrada en el cuerpo (BCC): celda unitaria con una distribución atómica en la que un átomo está en contacto con ocho átomos idénticos colocados en los vértices de un cubo imaginario.

Celda unitaria cúbica centrada en las caras (FCC): celda unitaria con una distribución atómica en la que 12 átomos rodean a un átomo central. La secuencia de apilamiento de capas de planos compactos en la estructura cristalina FCC es *ABCABC*…

Celda unitaria hexagonal compacta (HCP): celda unitaria con una distribución atómica en la que 12 átomos rodean a un átomo central idéntico. La secuencia de apilamiento de capas de los planos compactos es *ABABAB*...

Factor de empaquetamiento atómico (APF): volumen de átomos en una celda unitaria seleccionada dividido por el volumen de una celda unitaria.

Sección 3.5

Índices de dirección en un cristal cúbico: una dirección en una celda unitaria cúbica se indica por un vector dibujado desde el origen a un punto de la celda unitaria atravesando la superficie de la celda; las coordenadas de posición (x, y y z) donde el vector sale a la superficie de la celda unitaria (con las fracciones simplificadas) son los índices de dirección. Estos índices designados por u, v y w se encierran en un corchete [uvw]. Los índices negativos se indican con una barra sobre los índices.

Sección 3.6

Índices para los planos de un cristal cúbico (índices de Miller): los recíprocos de las intersecciones (con las fracciones simplificadas) de un plano cristalino con los ejes x, y y z de un cubo unidad se llaman índices de Miller del plano. Se designan por h, k y l para los ejes x, y y z, respectivamente, y se encierran en paréntesis como (hkl). Obsérvese que el plano cristalino seleccionado no debe pasar por el origen de los ejes x, y y z.

Sección 3.9

Densidad volumétrica ρ_v: masa por unidad de volumen; esta cantidad se expresa generalmente en Mg/m^3 o g/cm^3.

Densidad planar ρ_p: número equivalente de átomos cuyos centros están cortados por un área seleccionada y dividido por el área seleccionada.

Densidad linear ρ_l: el número de átomos cuyos centros se encuentran en una dirección específica de una arista específica del cubo unidad.

Sección 3.10

Polimorfismo (referente a metales): capacidad de un metal de existir en dos o más estructuras cristalinas. Por ejemplo, el hierro puede tener la estructura BCC o FCC, dependiendo de la temperatura.

Sección 3.12

Semicristalinos: materiales con regiones de estructura cristalina dispersa en la región amorfa circundante; por ejemplo, algunos polímeros.

Vidrio metálico: metales con una estructura atómica amorfa.

3.15 PROBLEMAS

Las respuestas a los problemas marcados con un asterisco se encuentran al final del libro.

3.1 Defina *a*) sólido cristalino y *b*) sólido amorfo.

3.2 Defina una estructura cristalina. Dé ejemplos de materiales que tengan estructuras cristalinas.

3.3 Defina *a*) red cristalina y *b*) patrón.

3.4 Defina celda unitaria de una red cristalina. ¿Qué constantes de red definen una celda unitaria?

3.5 ¿Cuáles son las 14 celdas unitarias de Bravais?

3.6 ¿Cuáles son las tres estructuras cristalinas más comunes en los metales? Indique cinco metales que tengan alguna de estas estructuras cristalinas.

3.7 ¿Cuántos átomos por celda unitaria hay en la estructura cristalina BCC?

3.8 ¿Cuál es el número de coordinación para los átomos en la estructura cristalina BCC?

3.9 ¿Cuál es la relación entre la longitud de una arista *a* en la celda unitaria BCC y el radio de sus átomos?

3.10 El molibdeno a 20°C es BCC y tiene un radio atómico de 0.140 nm. Calcule el valor para su constante de red *a* en nanómetros.

***3.11** El niobio a 20°C es BCC y tiene un radio atómico de 0.143 nm. Calcule el valor de su constante de red *a* en nanómetros.

3.12 El litio a 20°C es BCC y tiene una constante de red de 0.35092 nm. Calcule el valor del radio atómico de un átomo de litio en nanómetros.

***3.13** El sodio a 20°C es BCC y tiene una constante de red de 0.42906 nm. Calcule el valor del radio atómico de un átomo de sodio en nanómetros.

3.14 ¿Cuántos átomos por celda unitaria hay en la estructura cristalina FCC?

3.15 ¿Cuál es el número de coordinación para los átomos en la estructura cristalina FCC?

***3.16** El oro es FCC y tiene una constante de red de 0.40788 nm. Calcule el valor del radio atómico de un átomo de oro en nanómetros.

3.17 El platino es FCC y tiene una constante de red de 0.39239 nm. Calcule el valor del radio atómico de un átomo de platino en nanómetros.

***3.18** El paladio es FCC y tiene un radio atómico de 0.137 nm. Calcule el valor para su constante de red *a* en nanómetros.

3.19 El estroncio es FCC y tiene un radio atómico de 0.215 nm. Calcule el valor para su constante de red *a* en nanómetros.

3.20 Calcule el factor de empaquetamiento para la estructura FCC.

3.21 ¿Cuántos átomos por celda unitaria hay en una estructura cristalina HCP? Proporcione una respuesta para la celda primitiva y para la "celda mayor".

3.22 ¿Cuál es el número de coordinación para los átomos en la estructura cristalina HCP?

3.23 ¿Cuál es la relación *c/a* ideal en los metales HCP?

3.24 De los siguientes metales HCP: ¿cuáles tienen una relación *c/a* superior o inferior a la relación ideal: Zr, Ti, Zn, Mg, Co, Cd y Be?

***3.25** Calcule el volumen en nanómetros cúbicos de la celda unitaria de la estructura cristalina del titanio. El titanio es HCP a 20°C con $a = 0.29504$ nm y $c = 0.46833$ nm.

***3.26** El renio a 20°C es HCP. La altura c de su celda unitaria es de 0.44583 nm y su relación *c/a* es 1.633. Calcule el valor de su constante de red a en nanómetros (emplee la celda mayor).

3.27 El osmio a 20°C es HCP. Aplicando un valor de 0.135 nm para el radio atómico del átomo del osmio, calcule un valor para el volumen de la celda unitaria (emplee la celda mayor). Suponga un factor de empaquetamiento de 0.74.

3.28 ¿Cuáles son las posiciones atómicas en la celda unitaria cúbica?

3.29 Enumere las posiciones atómicas para los ocho átomos de los vértices y los seis del centro de las caras de celda unitaria FCC.

Tutorial

3.30 ¿Cuáles son los índices para las direcciones cristalográficas de una determinada celda unitaria cúbica?

***3.31** Dibuje las siguientes direcciones en una celda unitaria BCC y enumere las coordenadas de posición de los átomos cuyos centros los corta el vector de dirección.

a) [100] *b*) [110] *c*) [111]

3.32 Dibuje los vectores de dirección en cubos unidad para las siguientes direcciones:

a) $[1\bar{1}\bar{1}]$ *b*) $[1\bar{1}0]$ *c*) $[\bar{1}2\bar{1}]$ *d*) $[\bar{1}\bar{1}3]$

3.33 Dibuje los vectores de dirección en cubos unidad para las siguientes direcciones cúbicas:

a) $[1\bar{1}\bar{2}]$ *c*) $[\bar{3}31]$ *e*) $[2\bar{1}2]$ *g*) $[\bar{1}01]$ *i*) $[321]$ *k*) $[1\bar{2}\bar{2}]$

b) $[1\bar{2}3]$ *d*) $[0\bar{2}1]$ *f*) $[2\bar{3}3]$ *h*) $[12\bar{1}]$ *j*) $[10\bar{3}]$ *l*) $[\bar{2}\bar{2}3]$

3.34 ¿Cuáles son los índices de las direcciones mostradas en los cubos unidad de la figura P3.34?

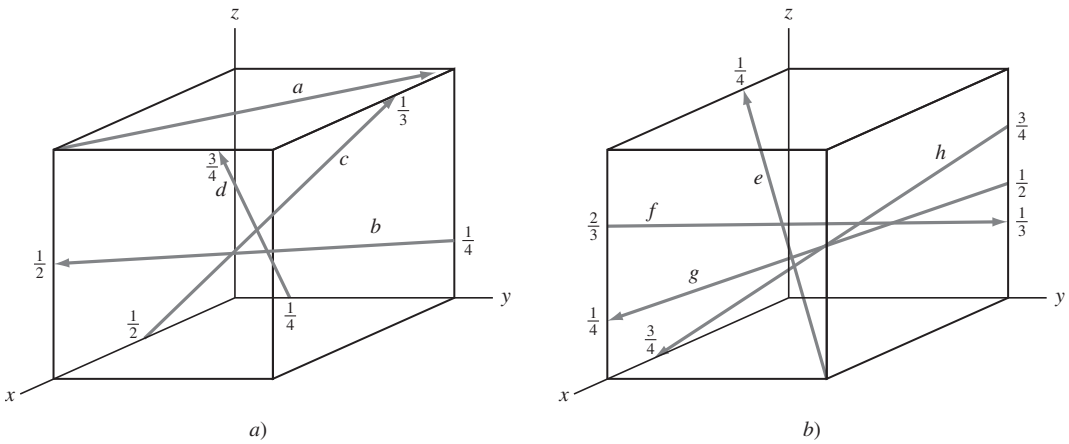


Figura P3.34

***3.35** Un vector de dirección pasa a través del cubo unidad desde la posición $(\frac{3}{4}, 0, \frac{1}{4})$ a la posición $(\frac{1}{2}, 1, 0)$. ¿Cuáles son sus índices de dirección?

3.36 Un vector de dirección pasa a través del cubo unidad desde la posición $(1, 0, \frac{3}{4})$ a la posición $(\frac{1}{4}, 1, \frac{1}{4})$. ¿Cuáles son los índices de dirección?

3.37 ¿Cuáles son las direcciones cristalográficas de una familia o forma? ¿Qué notación generalizada se utiliza para indicarla?

3.38 ¿Cuáles son las direcciones de la familia o forma $\langle 100 \rangle$ para el cubo unidad?

3.39 ¿Cuáles son las direcciones de la familia o forma $\langle 111 \rangle$ para el cubo unidad?

3.40 ¿Cuáles son las direcciones tipo $\langle 110 \rangle$ situadas en el plano (111) de una celda unitaria cúbica?

3.41 ¿Cuáles son las direcciones tipo $\langle 111 \rangle$ situadas en el plano 110 de una celda unitaria cúbica?

3.42 ¿Cómo se determinan los índices de Miller para un plano cristalográfico en una celda unitaria cúbica? ¿Qué notación generalizada se utiliza para indicarlo?

3.43 Dibuje en cubos unidad los planos cristalinos que tienen los siguientes índices de Miller:

a) $(1\bar{1}\bar{1})$ *c*) $(12\bar{1})$ *e*) $(3\bar{2}1)$ *g*) $(20\bar{1})$ *i*) $(\bar{2}32)$ *k*) $(3\bar{1}2)$

b) $(10\bar{2})$ *d*) $(21\bar{3})$ *f*) $(30\bar{2})$ *h*) $(\bar{2}1\bar{2})$ *j*) $(13\bar{3})$ *l*) $(\bar{3}3\bar{1})$

3.44 ¿Cuáles son los índices de Miller de los planos cúbicos cristalográficos mostrados en la figura P3.44?

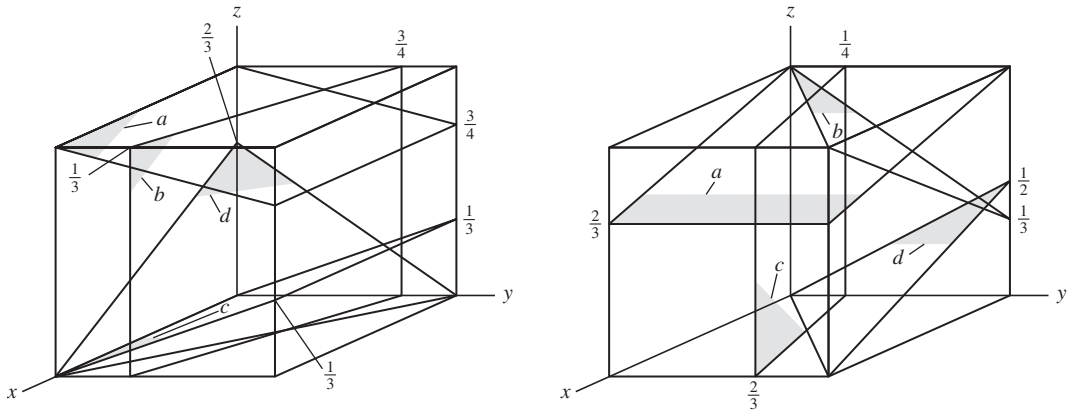


Figura P3.44

Tutorial MatVis

3.45 ¿Cuál es la notación utilizada para indicar una familia o forma de planos cúbicos cristalográficos?

***3.46** ¿Cuáles son los planos de la familia {100} en el sistema cúbico?

3.47 Dibuje los siguientes planos cristalográficos en una celda unitaria BCC y enumere la posición de los átomos cuyos centros están cortados por cada uno de los planos:
a) (100) *b*) (110) *c*) (111)

***3.48** Dibuje los siguientes planos cristalográficos en una celda unitaria FCC y enumere las coordenadas de posición de los átomos cuyos centros están cortados por cada uno de los planos:
a) (100) *b*) (110) *c*) (111)

***3.49** Un plano cúbico tiene las siguientes intersecciones axiales: $a = \frac{1}{3}, b = -\frac{2}{3}, c = \frac{1}{2}$. ¿Cuáles son los índices de Miller de este plano?

3.50 Un plano cúbico tiene las siguientes intersecciones axiales: $a = -\frac{1}{2}, b = -\frac{1}{2}, c = \frac{2}{3}$. ¿Cuáles son los índices de Miller de este plano?

***3.51** Un plano cúbico tiene las siguientes intersecciones axiales: $a = 1, b = \frac{2}{3}, c = -\frac{1}{2}$. ¿Cuáles son los índices de Miller de este plano?

***3.52** Determine los índices de Miller para el plano del cristal cúbico que interseca las siguientes coordenadas de posición: (1, 0, 0); $(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4})$; $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$.

3.53 Determine los índices de Miller para el plano cristalino cúbico que interseca las siguientes coordenadas de posición: $(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2})$; (0, 0, 1); (1, 1, 1).

***3.54** Determine los índices de Miller para el plano del cristal cúbico que interseca las siguientes coordenadas de posición: $(1, \frac{1}{2}, 1)$; $(\frac{1}{2}, 0, \frac{3}{4})$; $(1, 0, \frac{1}{2})$.

3.55 Determine los índices de Miller para el plano del cristal cúbico que interseca las siguientes coordenadas de posición: $(0, 0, \frac{1}{2})$; (1, 0, 0); $(\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, 0)$.

3.56 El rodio es FCC y tiene una constante de red a de 0.38044 nm. Calcule los siguientes espaciados interplanares:

a) d_{111} *b*) d_{200} *c*) d_{220}

***3.57** El volframio es BCC y tiene una constante de red a de 0.31648 nm. Calcule los siguientes espacios interplanares:

a) d_{110} *b*) d_{220} *c*) d_{310}

***3.58** El espacio interplanar d_{310} en un elemento BCC es de 0.1587 nm. *a*) ¿Cuál es su constante de red a? *b*) ¿Cuál es el radio atómico del elemento? *c*) ¿Qué elemento podría ser?

***3.59** El espacio interplanar d_{422} en un metal FCC es de 0.083397 nm. *a*) ¿Cuál es su constante de red a?; *b*) ¿Cuál es el radio atómico del metal? y *c*) ¿Qué metal podría ser?

3.60 ¿Cómo se determinan los planos cristalográficos en la celda unitaria HCP?

3.61 ¿Qué notación se utiliza para describir los planos cristalinos HCP?

3.62 Dibuje los planos de los cristales hexagonales cuyos índices de Miller-Bravais son:

a) $(10\bar{1}1)$ *d*) $(1\bar{2}12)$ *g*) $(\bar{1}2\bar{1}2)$ *j*) $(\bar{1}100)$

b) $(01\bar{1}1)$ *e*) $(2\bar{1}\bar{1}1)$ *h*) $(2\bar{2}00)$ *k*) $(\bar{2}111)$

c) $(\bar{1}2\bar{1}0)$ *f*) $(1\bar{1}01)$ *i*) $(10\bar{1}2)$ *l*) $(\bar{1}012)$

MatVis

***3.63** Determine los índices de Miller-Bravais de los planos de los cristales hexagonales de la figura P3.63.

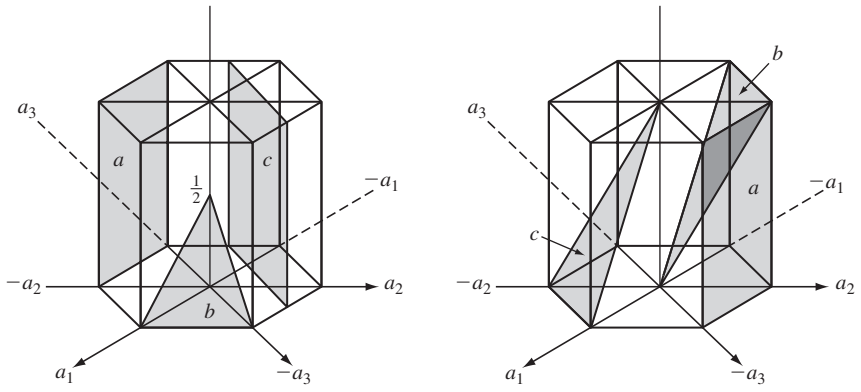


Figura P3.63

3.64 Determine los índices de dirección Miller-Bravais de las direcciones $-a_1$, $-a_2$ y $-a_3$.

***3.65** Determine los índices de dirección Miller-Bravais de las direcciones de los vectores que tienen su origen en el centro del plano basal inferior y terminan en el plano basal superior como se indica en la figura 3.18*d*.

3.66 Determine los índices de dirección Miller-Bravais de las direcciones de los vectores del plano basal que tienen su origen en el centro del plano basal inferior y terminan en el punto medio entre los ejes principales planares.

***3.67** Determine los índices de dirección Miller-Bravais de las direcciones indicadas en la figura P3.67.

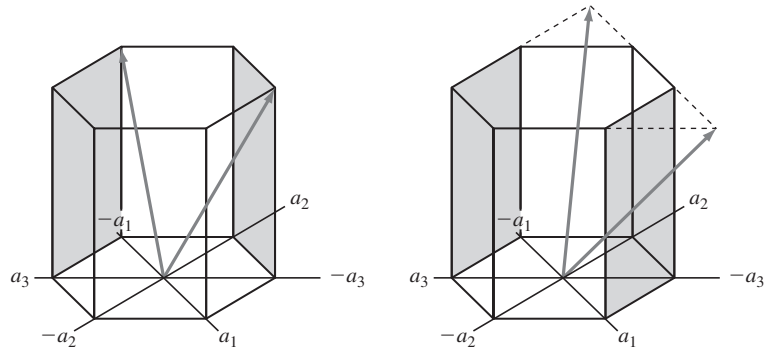


Figura P3.67

3.68 ¿Cuál es la diferencia en el orden de apilamiento de los planos de empaquetamiento compactos en *a*) la estructura cristalina HCP y *b*) la estructura cristalina FCC?

3.69 ¿Cuáles son los planos más densamente empaquetados en *a*) la estructura FCC y *b*) la estructura HCP?

3.70 ¿Cuáles son las direcciones compactas en *a*) la estructura FCC y *b*) la estructura HCP?

***3.71** La constante de red para el tántalo BCC a 20°C es 0.33026 nm y su densidad es de 16.6 g/cm^3. Calcule un valor para su masa atómica.

3.72 Calcule un valor para la densidad del platino FCC en gramos por centímetro cúbico a partir de su constante de red *a* de 0.39239 nm y de su masa atómica de 195.09 g/mol.

3.73 Calcule la densidad atómica planar en átomos por milímetro cuadrado para los siguientes planos cristalinos en el cromo BCC, con una constante de red de 0.28846 nm:

a) (100), *b*) (110), *c*) (111).

***3.74** Calcule la densidad atómica planar en átomos por milímetro cuadrado para los siguientes planos del cristal de oro FCC, con una constante de red de 0.40788 nm:

a) (100), *b*) (110), *c*) (111).

3.75 Calcule la densidad atómica planar en átomos por milímetro cuadrado para el plano (0001) en el berilio HCP, con una constante de red de $a = 0.22856$ nm y c de 0.35832 nm.

***3.76** Calcule la densidad atómica lineal en átomos por milímetro para el vanadio BCC, que tiene una constante de red de 0.3039 nm en las direcciones siguientes:

a) [100], *b*) [110], *c*) [111].

3.77 Calcule la densidad atómica lineal en átomos por milímetro para el iridio FCC, que tiene una constante de red de 0.38389 nm, en las siguientes direcciones:

a) [100], *b*) [110], *c*) [111].

3.78 ¿Qué es el polimorfismo referido a los metales?

3.79 El titanio presenta un cambio polimórfico de estructura cristalina BCC a HCP por enfriamiento desde 882°C. Calcule el porcentaje del cambio en el volumen cuando la estructura cristalina cambia de BCC a HCP. La constante de red a de la celda unitaria BCC a 882°C es de 0.332 nm, y la celda unitaria HCP tiene $a = 0.2950$ nm y $c = 0.4683$ nm.

***3.80** El hierro puro presenta un cambio polimórfico de estructura cristalina BCC a FCC calentándolo por encima de 912°C. Calcule el porcentaje de cambio en el volumen asociado con el cambio de la estructura cristalina de BCC a FCC si a 912°C la celda unitaria BCC tiene una constante de red $a = 0.293$ nm, y en la celda unitaria $a = 0.363$ nm.

3.81 ¿Qué son los rayos X y cómo se producen?

3.82 Dibuje un diagrama esquemático de un tubo de rayos X utilizado para difracción de rayos X, e indique el camino de los electrones y de los rayos X.

3.83 ¿Qué es la radiación característica de rayos X? ¿Cuál es su origen?

3.84 Distinga la interferencia destructiva e interferencia constructiva de rayos X reflejados por los cristales.

3.85 Deduzca la ley de Bragg utilizando el caso sencillo en que un haz de rayos X incidentes es difractado por planos paralelos en un cristal.

***3.86** Una muestra de un metal BCC se coloca en un difractómetro de rayos X utilizando rayos X de longitud $\lambda = 0.1541$ nm. La difracción de los planos {221} se obtiene a $2\theta = 88.838°$. Calcule un valor para la constante de red a para este metal BCC. (Suponga una difracción de primer orden, $n = 1$.)

3.87 Rayos X de longitud de onda desconocida se difractan por una muestra de oro. El ángulo 2θ es de 64.582° para los planos {220}. ¿Cuál es la longitud de onda de los rayos X utilizados? (La constante de celda del oro es = 0.40788 nm; suponga una difracción de primer orden, $n = 1$.)

3.88 Un difractograma para un elemento que tiene una estructura cristalina BCC o FCC presenta picos de difracción a los valores de ángulo 2θ siguientes: 41.069°, 47.782°, 69.879° y 84.396°. (La longitud de onda de la radiación incidente λ es de 0.15405 nm.)[9]

a) Determine la estructura cristalina del elemento.

b) Determine la constante de red del elemento.

c) Identifique al elemento.

***3.89** Un difractograma para un elemento que tiene una estructura cristalina BCC o FCC presenta picos de difracción a los valores de ángulo 2θ siguientes: 38.68°, 55.71°, 69.70°, 82.55°, 95.00° y 107.67°. (La longitud de onda de la radiación incidente λ es de 0.15405 nm.)

a) Determine la estructura cristalina del elemento.

b) Determine la constante de red del elemento.

c) Identifique al elemento.

[9] Datos de difracción de rayos X por cortesía de International Centre for Diffraction Data.

3.90 Un difractograma de rayos X para un elemento que tiene una estructura cristalina BCC o FCC presenta picos de difracción a los valores de ángulo 2θ siguientes: 36.191°, 51.974°, 64.982° y 76.663°. (La longitud de onda de la radiación incidente es de 0.15405 nm.)

a) Determine la estructura cristalina del elemento.

b) Determine la constante de red del elemento.

c) Identifique al elemento.

***3.91** Un difractograma de rayos X para un elemento que tiene una estructura cristalina BCC o FCC presenta picos de difracción a los valores de ángulo 2θ siguientes: 40.633°, 47.314°, 69.144° y 83.448°. (La longitud de onda de la radiación λ incidente es de 0.15405 nm.)

a) Determine la estructura cristalina del elemento.

b) Determine la constante de red del elemento.

c) Identifique al elemento.

3.92 Explique, en términos generales, por qué muchos polímeros tienen una estructura amorfa o semicristalina.

3.93 Explique, en términos generales, por qué los vidrios cerámicos tienen una estructura amorfa.

3.94 Explique el proceso mediante el cual algunos materiales pueden alcanzar una estructura amorfa.

3.16 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. En el diseño de chips de ordenadores y aparatos para microelectrónica se utilizan obleas de monocristales de silicio en los bloques constitutivos del sistema. *a*) ¿A qué clase de materiales pertenece el silicio? *b*) Explique el enlace y estructura cristalina del silicio cristalino. *c*) Proponga un proceso por el que se puedan fabricar monocristales de silicio.

2. El acero se fabrica añadiendo pequeños átomos de carbono a la estructura cristalina del hierro. Cuando la estructura cristalina del hierro es FCC, es posible añadir más carbono a la estructura. No obstante, la estructura normal a temperatura ambiente es BCC.
Diseñe un proceso que permita la introducción de más carbono en la estructura del hierro en estado sólido.

3. Le han entregado un material desconocido y le han pedido que lo identifique con su mejor capacidad. ¿Qué pruebas realizaría para identificar el material?

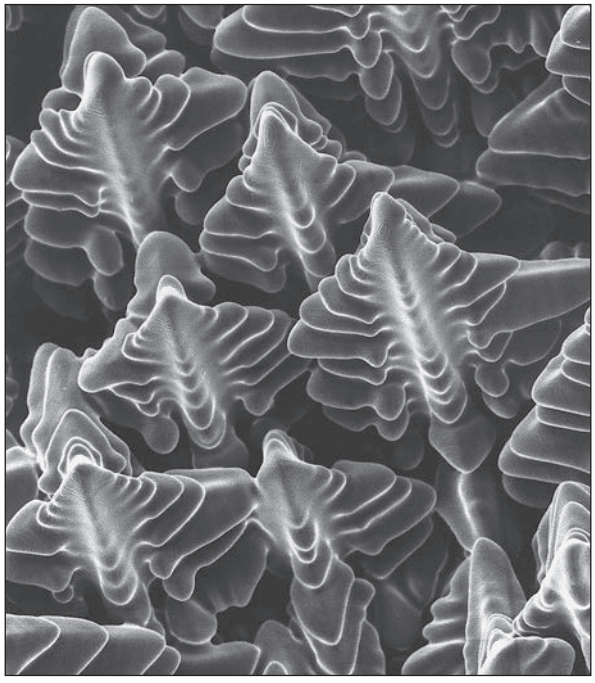
4. A menudo, los álabes de las turbinas que trabajan a elevadas temperaturas y altos niveles de tensión se fabrican con grandes monocristales. *a*) Especule sobre las ventajas de un álabe de turbina monocristalina. *b*) ¿Qué propiedades debería tener el material seleccionado? *c*) ¿Qué material específico seleccionaría para hacer un álabe de turbina monocristalina?

5. Nombre todas las formas alotrópicas del carbono que conozca y exponga su estructura cristalina.

6. Las obleas de silicio se recubren a menudo de una fina capa de nitruro de aluminio a altas temperaturas (1 000°C). El coeficiente de expansión térmica del silicio cristalino es significativamente diferente al del nitruro de aluminio. ¿Puede esto ocasionar problemas? Justifique la respuesta.

CAPÍTULO 4

Solidificación e imperfecciones cristalinas



(Foto cortesía de Stan David y Lynn Boatner, Oak Ridge National Library)

Cuando se cuelan las aleaciones fundidas, se inicia la solidificación en las paredes del molde a medida que se enfrían. La aleación no se solidifica a una temperatura determinada, sino dentro de un intervalo de temperaturas. Mientras la aleación se encuentra en este intervalo, tiene una forma pastosa que consiste en estructuras arborescentes llamadas *dendritas* (cuyo significado es *semejantes a árboles*) y metal líquido. El tamaño y forma de las dendritas depende de la velocidad de enfriamiento. El metal líquido que se encuentra entre estas estructuras tridimensionales dendríticas, finalmente se solidifica formando una estructura completamente sólida que se denomina estructura granular. El estudio de las dendritas es importante pues influye en las variaciones de composición, porosidad y segregación, y, por consiguiente, en las propiedades del metal salido del molde. La fotografía en esta página muestra la estructura tridimensional de las dendritas. En ésta se observa un "bosque" de dendritas formado durante la solidificación de una superaleación con base de níquel.[1] ■

[1] http://magnews.msfc.nasa.gov/IDGE/IDGE.html

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Describir el proceso de solidificación de los metales, y distinguir la nucleación homogénea de la heterogénea.
2. Describir las dos energías que participan en el proceso de solidificación de un metal puro, y escribir la ecuación del cambio total en la energía libre asociado con la del paso del estado líquido al núcleo sólido.
3. Distinguir los granos equiaxiales de los columnares y la ventaja de los primeros sobre los segundos.
4. Distinguir los materiales monocristalinos de los poliscristalinos y explicar por qué las formas monocristalinas y policristalinas de los materiales tienen distintas propiedades mecánicas.
5. Describir las diversas formas de soluciones sólidas metálicas y explicar las diferencias entre solución sólida y aleaciones mezcladas.
6. Clasificar diversos tipos de imperfecciones cristalinas y explicar el papel de los defectos sobre las propiedades mecánicas y eléctricas de los materiales cristalinos.
7. Determinar el número de tamaño de grano y el diámetro medio de tamaño de grano según la ASTM y describir la importancia del tamaño de grano y la densidad de límite de grano sobre la conducta de los materiales cristalinos.
8. Aprender cómo y por qué se aplican las técnicas de microscopia óptica, SEM, TERM, HRTEM, AFM y STM para comprender más acerca de las estructuras internas y superficiales de los materiales a diversas magnificaciones.
9. Explicar, en términos generales, por qué las aleaciones son materiales que se prefieren sobre los metales puros para aplicaciones estructurales.

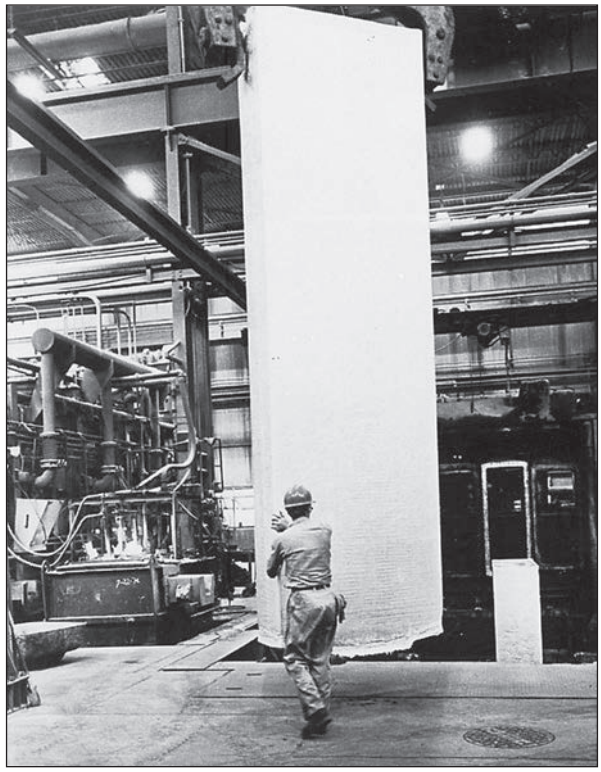
4.1 SOLIDIFICACIÓN DE METALES

La solidificación de metales y aleaciones es un importante proceso industrial, dado que la mayoría de metales se funden para moldearlos como productos semiacabados o acabados. En la figura 4.1 se muestra un gran lingote de aluminio de colada en semicontinuo[2] para ser utilizado posteriormente en la fabricación de aleaciones de laminados de aluminio. En ella se muestra la gran escala a la que se realizan los procesos de moldeo (solidificación) de los metales.

En general, la solidificación de un metal o aleación puede dividirse en las siguientes etapas:

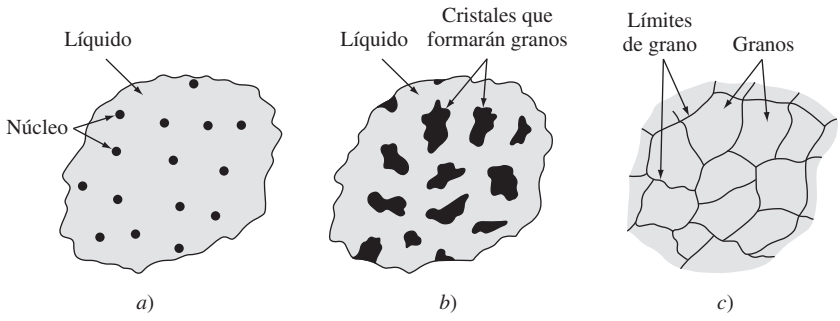
1. La formación de **núcleos** estables (figura 4.2*a*) en el fundido (nucleación).
2. El crecimiento de núcleos para formar cristales (figura 4.2*b*) y la formación de una estructura granular (figura 4.2*c*).

[2] Un lingote colado en semicontinuo se obtiene por solidificación del metal fundido (por ejemplo, aleaciones de aluminio o de cobre) en un molde que tiene el bloque inferior móvil (véase la figura 4.8) el cual baja lentamente a medida que el metal solidifica. Se emplea el prefijo *semi-* porque la longitud máxima del lingote producido está determinada por la profundidad del foso al que se baja el bloque inferior.



Animación

Figura 4.1
Un gran lingote de aluminio colado en semicontinuo es extraído del foso de fundición. Los lingotes de este tipo se laminan posteriormente en caliente o en frío en láminas o en chapas.
(Cortesía de Reynolds Metals Co.)



Laboratorio virtual

Figura 4.2
Ilustración esquemática mostrando las diversas etapas en la solidificación de metales: *a*) formación de núcleos; *b*) crecimiento de los núcleos hasta formar cristales y *c*) unión de cristales para formar granos y límites de granos asociados. Nótese que los granos están orientados al azar.

Figura 4.3
Agrupación de granos de una parte de un lingote de fundición de titanio al arco eléctrico obtenido por impacto de un martillo. La agrupación ha mantenido las verdaderas facetas de unión de los granos individuales de la estructura original acabada de moldear. (Ampliación $\frac{1}{6}\times$.)
(Según W. Rostoker y J. R. Dvorak, "Interpretation of Metallographic Structures", Academia, 1965, p. 7.)

En la figura 4.3 se muestra la forma de algunos granos reales formados por la solidificación de una aleación de titanio. La forma que adquiere cada grano después de la solidificación depende de muchos factores, entre los cuales es importante el gradiente térmico. Los granos mostrados en la figura 4.3 son *equiaxiales*, ya que su crecimiento ha sido casi igual en todas las direcciones.

4.1.1 Formación de núcleos estables en metales líquidos

Los dos mecanismos principales por los que tiene lugar la nucleación de partículas sólidas en un metal líquido, son: la nucleación homogénea y la nucleación heterogénea.

Nucleación homogénea Se considera en primer lugar la nucleación homogénea porque es el caso más simple de nucleación. La **nucleación homogénea** tiene lugar en el líquido fundido cuando el metal proporciona por sí mismo los átomos que se requieren para formar los núcleos. Considérese el caso de un metal puro solidificando. Cuando un metal líquido puro se enfría lo suficiente por debajo de su temperatura de equilibrio de solidificación, se crean numerosos núcleos homogéneos mediante el movimiento lento de los átomos que se unen entre sí. La nucleación homogénea suele requerir de un nivel alto de subenfriamiento que puede llegar a ser de varios cientos de grados centígrados para algunos metales (véase la tabla 4.1). Para que un núcleo estable pueda transformarse en un cristal debe alcanzar un *tamaño crítico.* Una agrupación de átomos enlazados entre sí con un tamaño menor al tamaño crítico, se llama **embrión**; y otra que sea mayor que el tamaño crítico, se llama *núcleo*. A causa de su inestabilidad, los embriones se forman y redisuelven constantemente en el metal fundido, debido a la agitación de los átomos.

Energías que participan en la nucleación homogénea En la nucleación homogénea de un metal puro que está solidificando deben considerarse dos tipos de cambios de energía: 1) la *energía libre de volumen* liberada por la transformación de líquido a sólido y 2) la *energía libre de superficie* necesaria para formar las nuevas superficies sólidas de las partículas solidificadas.

Tabla 4.1 Valores para la temperatura de solidificación, calor de fusión, energía de superficie y máximo subenfriamiento para algunos metales seleccionados

Metal	Temperatura de solidificación °C	Temperatura de solidificación K	Calor de fusión (J/cm³)	Energía de superficie (J/cm²)	Máximo subenfriamiento observado (ΔT[°C])
Pb	327	600	280	33.3×10^{-7}	80
Al	660	933	1 066	93×10^{-7}	130
Ag	962	1 235	1 097	126×10^{-7}	227
Cu	1 083	1 356	1 826	177×10^{-7}	236
Ni	1 453	1 726	2 660	255×10^{-7}	319
Fe	1 535	1 808	2 098	204×10^{-7}	295
Pt	1 772	2 045	2 160	240×10^{-7}	332

Fuente: B. Chalmers, "Solidification of Metals", Wisley, 1964.

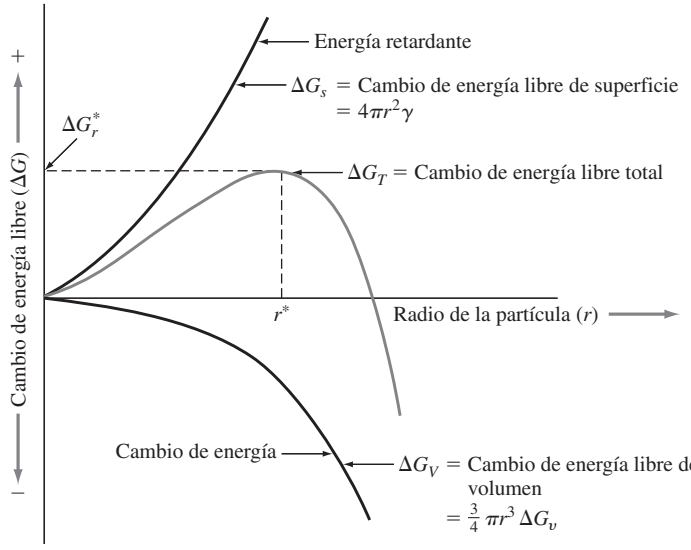


Figura 4.4
Cambio de energía libre ΔG en función del radio del embrión o del núcleo creado por la solidificación de un metal puro. Si el radio de la partícula es mayor que r^*, el núcleo estable continuará creciendo.

Cuando un metal puro líquido, por ejemplo el plomo, se enfría por debajo de su temperatura de solidificación de equilibrio, la energía motriz para la transformación de líquido a sólido está dada por la diferencia en la energía libre de volumen ΔG_v del líquido y la del sólido. Si ΔG_v es el cambio de energía libre entre el líquido y el sólido por unidad de volumen de metal, el cambio de energía libre para un *núcleo esférico* de radio r es $\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v$, ya que el volumen de una esfera es $\frac{4}{3}\pi r^3$. En la figura 4.4, en la curva inferior, se muestra esquemáticamente la variación de la energía libre volumétrica

en función del radio r de un embrión o de un núcleo y es una cantidad negativa, ya que en la transformación de líquido a sólido se libera energía.

Sin embargo, existe una energía que se opone a la formación de embriones y núcleos, y es la energía que hace falta para formar la superficie de estas partículas. La energía necesaria para crear una superficie para estas partículas esféricas ΔG_s, es igual a la energía libre de superficie específica de la partícula γ, multiplicada por el área de la superficie de la esfera, o $4\pi r^2\gamma$, donde $4\pi r^2$ es el área de la superficie de una esfera. En la curva ascendente de la parte superior positiva de la figura 4.4 se muestra esta energía retardante ΔG_s para la formación de partículas sólidas. La energía libre total asociada a la formación de un embrión o de un núcleo, que es la suma de los cambios de energía libre volumétrica y de la energía libre superficial, se encuentra en la curva intermedia de la figura 4.4. El cambio de energía libre total para la formación de un embrión esférico o de un núcleo de radio r formado por enfriamiento de un metal puro, está dado por la ecuación:

$$\Delta G_T = \tfrac{4}{3}\pi r^3\,\Delta G_v + 4\pi r^2\gamma \qquad \textbf{(4.1)}$$

donde ΔG_T = cambio de energía libre total
r = radio del embrión o del núcleo
ΔG_v = cambio de energía libre volumétrica
γ = energía libre de superficie específica

En la naturaleza, un sistema puede cambiar espontáneamente de un estado de mayor energía a uno de menor energía. En el caso de la solidificación de un metal puro, si las partículas sólidas formadas durante la solidificación tienen un radio menor al del **radio crítico** r^*, la energía del sistema puede disminuir y las partículas se redisuelven. Estos pequeños embriones pueden, por lo tanto, redisolverse en el metal líquido. Sin embargo, si las partículas sólidas tienen radios mayores a r^*, la energía del sistema puede hacerse menor cuando estas partículas (núcleo) se convierten en partículas más grandes o cristales (figura 4.2*b*). Cuando r alcanza el radio crítico r^*, ΔG_T llega a su máximo valor ΔG^* (figura 4.4).

Se puede obtener una relación entre el tamaño del núcleo crítico, la energía libre superficial y la energía libre volumétrica para la solidificación de un metal puro, diferenciando la ecuación 4.1. La diferencial de la energía libre total ΔG_T respecto a r, es cero cuando $r = r^*$ dado que la representación de la energía libre total frente al radio del embrión o núcleo presenta un máximo y la pendiente $d(\Delta G_T)/dr = 0$. Así,

$$\frac{d(\Delta G_T)}{dr} = \frac{d}{dr}\left(\frac{4}{3}\pi r^3\Delta G_v + 4\pi r^2\gamma\right)$$

$$\frac{12}{3}\pi r^{*2}\,\Delta G_V + 8\pi r^*\gamma = 0 \qquad \textbf{(4.1a)}$$

$$r^* = -\frac{2\gamma}{\Delta G_v}.$$

El radio crítico con respecto al subenfriamiento A mayor grado de subenfriamiento ΔT por debajo de la temperatura de equilibrio de fusión del metal, mayor es el cambio de energía libre de volumen ΔG_V. Sin embargo, el cambio de energía libre de-

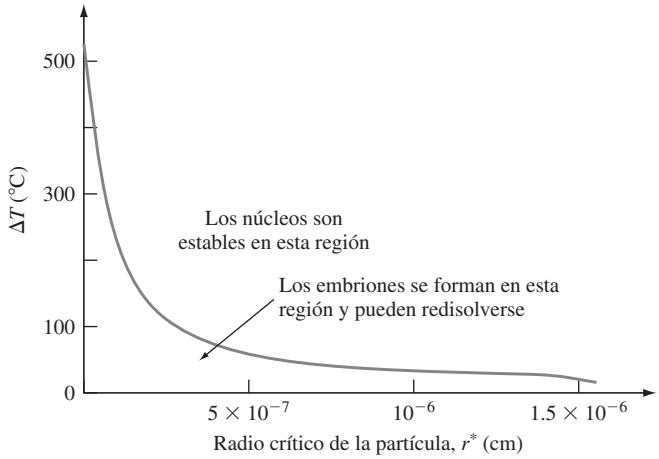


Figura 4.5
Radio crítico de los núcleos de cobre en comparación con el grado de subenfriamiento ΔT.
(Según B. Chalmers, "Principles of Solidification", Wiley, 1964.)

bido a la energía de superficie ΔG_s no varía mucho con la temperatura. De este modo, el tamaño crítico del núcleo está determinado fundamentalmente por ΔG_v. Cerca de la temperatura de solidificación, el tamaño crítico del núcleo debe ser infinito, dado que ΔT tiende a cero. A medida que aumenta el subenfriamiento, el tamaño del núcleo crítico disminuye. En la figura 4.5 se muestra la variación del tamaño crítico del núcleo de cobre en función del subenfriamiento. El subenfriamiento máximo para la nucleación homogénea en metales puros presentado en la tabla 4.1 es de 327 a 1 772°C. El tamaño crítico del núcleo está relacionado con el subenfriamiento por la relación

$$r^* = \frac{2\gamma T_m}{\Delta H_f \Delta T} \tag{4.2}$$

donde r^* = radio crítico del núcleo
γ = energía libre superficial
ΔH_f = calor latente de fusión
ΔT = cantidad de subenfriamiento a la que se ha formado el núcleo.

El problema de ejemplo 4.1 muestra cómo se puede calcular el número de átomos en el núcleo crítico partiendo de datos experimentales.

PROBLEMA DE EJEMPLO 4.1

a) Calcule el radio crítico (en centímetros) de un núcleo homogéneo que se forma al solidificar cobre puro líquido. Considere ΔT (subenfriamiento) = $0.2T_m$. Aplique los datos de la tabla 4.1.
b) Calcule el número de átomos en el núcleo de tamaño crítico a esta temperatura de subenfriamiento.

■ **Solución**

a) Cálculo del radio crítico del núcleo:

$$r^* = \frac{2\gamma T_m}{\Delta H_f \Delta T} \tag{4.2}$$

$$\Delta T = 0.2T_m = 0.2(1\,083°C + 273) = (0.2 \times 1\,356\ K) = 271\ K$$

$$\gamma = 177 \times 10^{-7}\ J/cm^2 \quad \Delta H_f = 1\,826\ J/cm^3 \quad T_m = 1\,083°C = 1\,356\ K$$

$$r^* = \frac{2(177 \times 10^{-7}\ J/cm^2)(1\,356\ K)}{(1\,856\ J/cm^3)(271\ K)} = 9.70 \times 10^{-8}\ cm \blacktriangleleft$$

b) Cálculo del número de átomos en un núcleo de tamaño crítico:

$$\text{Volumen de un núcleo de tamaño crítico} = \tfrac{4}{3}\pi r^{*3} = \tfrac{4}{3}\pi(9.70 \times 10^{-8}\ cm)^3 = 3.82 \times 10^{-21}\ cm^3$$

$$\text{Volumen de una celda unidad del Cu } (a = 0.361\ nm) = a^3 = (3.61 \times 10^{-8}\ cm)^3 = 4.70 \times 10^{-23}\ cm^3$$

Dado que hay cuatro átomos de cobre por la celda unitaria FCC,

$$\text{Volumen/átomo} = \frac{4.70 \times 10^{-23}\ cm^3}{4} = 1.175 \times 10^{-23}\ cm^3$$

Así, el número de átomos por núcleo crítico homogéneo es:

$$\frac{\text{Volumen del núcleo}}{\text{Volumen/átomo}} = \frac{3.82 \times 10^{-21}\ cm^3}{1.175 \times 10^{-23}\ cm^3} = 325\ \text{átomos} \blacktriangleleft$$

Nucleación heterogénea La **nucleación heterogénea** es la que tiene lugar en un líquido sobre la superficie del recipiente que lo contiene, las impurezas insolubles u otros materiales estructurales disminuyen la energía libre necesaria para formar un núcleo estable. Dado que en las operaciones de fundición industrial no se producen grandes subenfriamientos, normalmente varían entre 0.1 y 10°C, la nucleación es heterogénea y no homogénea.

Para que ocurra la nucleación heterogénea, el agente de nucleación sólido (impureza sólida o recipiente) debe ser mojado por el metal líquido. También el líquido debe solidificar fácilmente en el agente de nucleación. En la figura 4.6 se muestra un agente de nucleación (sustrato) humedecido por el líquido a solidificar, lo cual crea un pequeño ángulo de contacto θ entre el metal sólido y el agente de nucleación. La nucleación heterogénea ocurre sobre el agente de nucleación porque la energía superficial para formar el núcleo estable es inferior a que si el núcleo se formara en el propio líquido puro (nucleación homogénea). Al ser menor la energía superficial para nucleación heterogénea, el cambio de energía libre total para la formación de un núcleo estable deberá ser también menor y también será menor el tamaño del núcleo crítico. De esta forma, se requiere menor subenfriamiento para producir un núcleo estable por nucleación heterogénea.

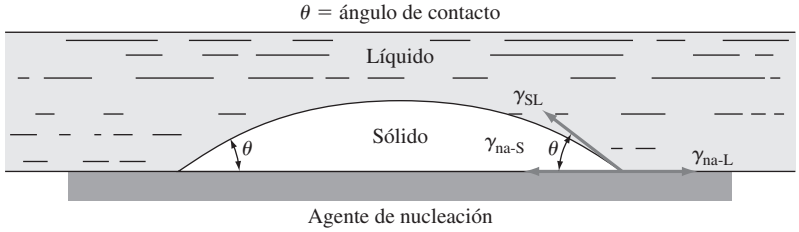


Figura 4.6
Nucleación heterogénea de un sólido en un agente de nucleación. na = agente de nucleación, SL = sólido-líquido, S = sólido, L = líquido; θ = ángulo de contacto.
(Según J. H. Brophy, R. M. Rose y John Wulff, "Structure and Properties of Materials", vol. II: "Thermodynamics of Structure", Wiley, 1964, p. 105.)

4.1.2 Crecimiento de cristales de un metal líquido y formación de una estructura granular

Después que se forman los núcleos estables en un metal en solidificación, crecen hasta formar cristales, como se muestra en la figura 4.2*b*. En cada cristal los átomos están ordenados en un modelo esencialmente regular, pero la orientación de cada cristal varía (figura 4.2*b*). Cuando finalmente concluye la solidificación del metal, los cristales se juntan unos con otros en diferentes orientaciones y forman límites cristalinos en los que los cambios de orientación tienen lugar en una distancia de pocos átomos (figura 4.2*c*). Un metal solidificado que contenga muchos cristales se llama *policristalino*. En el metal solidificado los cristales se llaman **granos** y las superficies entre ellos, *límites de grano.*

El número de puntos de nucleación disponible para el metal en proceso de solidificación afecta a la estructura granular del metal sólido producido. Si hay relativamente pocos puntos de nucleación disponibles durante la solidificación, se producirá una estructura de grano grueso y basta. Si hay muchos puntos de nucleación disponibles durante la solidificación, se obtendrá una estructura de grano fino. La mayoría de los metales y aleaciones en ingeniería se funden con una estructura de grano fino, dado que es el tipo de estructura más deseable para conseguir resistencia y uniformidad en productos metálicos acabados.

Cuando un metal relativamente puro se moldea en un molde fijo sin utilizar *afinadores de grano*,[3] se producen normalmente dos tipos de estructuras de grano principalmente:

1. Granos equiaxiales
2. Granos columnares

Si las condiciones de nucleación y crecimiento en el metal líquido durante la solidificación son tales que los cristales pueden crecer por igual en todas las direcciones, se obtendrán **granos equiaxiales**. Los granos equiaxiales se encuentran normalmente jun-

[3] Un afinador de grano es un material añadido al metal fundido para alcanzar granos finos en la estructura granular final.

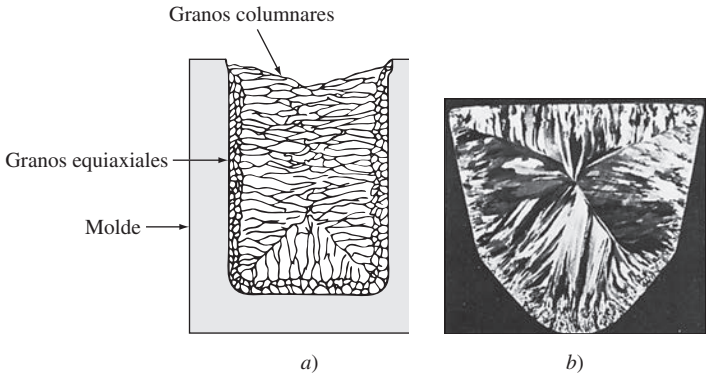


Figura 4.7
a) Dibujo esquemático de una estructura granular de un metal solidificado obtenido utilizando un molde frío. *b*) Sección transversal de un lingote de aleación de aluminio 1100 (99.0% Al) moldeado por el método Properzi (método de rueda y banda). Adviértase la consistencia con la que los granos columnares crecen perpendicularmente a la pared del molde frío.
(Según, "Metals Handbook", vol. 8, 8a. ed., American Society for Metals, 1973, p. 164.)

to a la pared del molde frío, como se muestra en la figura 4.7. Un gran enfriamiento cerca de la pared crea una elevada concentración de núcleos durante la solidificación, una condición necesaria para producir una estructura de granos equiaxiales.

Los **granos columnares** son alargados, delgados y burdos, y se forman cuando un metal se solidifica muy lentamente en presencia de un fuerte gradiente de temperaturas. Relativamente pocos núcleos están disponibles cuando se producen los granos columnares. En la figura 4.7 se presentan granos equiaxiales y columnares. Obsérvese que en la figura 4.7*b* los granos columnares han aparecido perpendicularmente a las caras del molde, ya que se presentan grandes gradientes térmicos en esas direcciones.

4.1.3 Estructura granular de las fundiciones industriales

En la industria, los metales y aleaciones se moldean en varias formas. Si el metal va a ser trabajado después de la fundición, se obtienen primero grandes coladas de forma sencilla para después fabricar el producto semiacabado. Por ejemplo, en la industria del aluminio, las formas más habituales para las operaciones posteriores son los planchones (figura 4.1), de corte transversal rectangular, y los lingotes para extrusión,[4] que tienen corte transversal circular. Para algunas aplicaciones, el metal se cuela en su forma definitiva; por ejemplo, el pistón de un automóvil (véase la figura 6.3).

Los grandes planchones de aleación de aluminio que se muestran en la figura 4.1 se colaron mediante un proceso de colada semicontinua con enfriamiento directo. En

[4] *Extrusión* es el proceso de convertir un lingote metálico en tramos de corte transversal uniforme forzando al metal pastoso a pasar a través de una matriz u orificio que cuenta con el corte transversal que se desea.

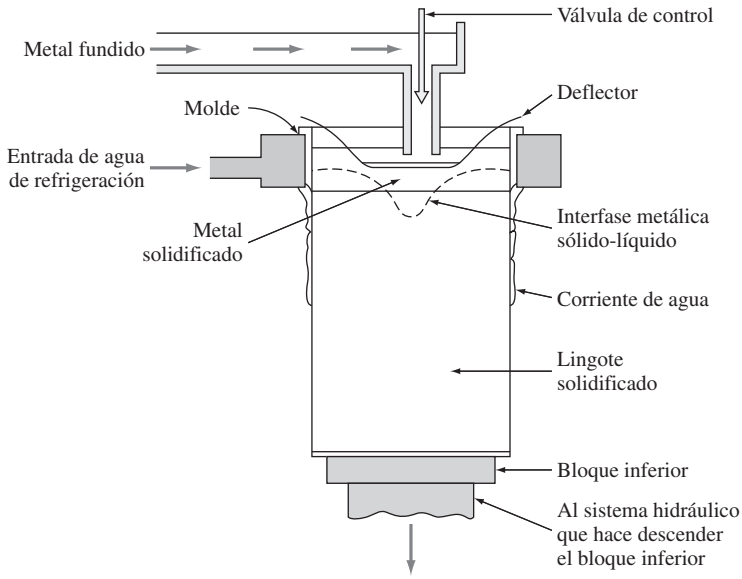


Figura 4.8
Esquema de un lingote de aleación de aluminio en una unidad colada en semicontinuo con enfriamiento directo.

este método de colada el metal fundido se vacía en un molde con un fondo móvil que desciende lentamente a medida que se llena (figura 4.8). El molde se enfría por agua mediante una camisa y también se rocía agua en los laterales de la superficie solidificada del lingote. Por este procedimiento pueden colocarse continuamente grandes lingotes de aproximadamente 15 pies de longitud, como se muestra en la figura 4.1. En la industria del acero, aproximadamente 60% del metal se cuela en moldes fijos, el restante 40% se obtiene por colada continua, como se muestra en la figura 4.9.

Para producir lingotes moldeados con un tamaño de grano fino se añaden habitualmente afinadores de grano al metal líquido antes de la colada. En las aleaciones de aluminio se añaden al metal líquido, justo antes de la colada, pequeñas cantidades de elementos afinadores de grano como titanio, boro o circonio, de forma que durante la solidificación exista una fina dispersión de núcleos heterogéneos. En la figura 4.10 se muestra el efecto del empleo de afinadores de grano durante la colada de un lingote de extrusión de aluminio de 6 pulgadas de diámetro. La sección del lingote de colada sin afinadores de grano presenta grandes granos columnares (figura 4.10*a*) y la sección del lingote con afinadores de grano presenta una estructura fina de granos equiaxiales (figura 4.10*b*).

4.2 SOLIDIFICACIÓN DE MONOCRISTALES

La mayoría de los materiales cristalinos para ingeniería están formados por muchos cristales y, por consiguiente, son **policristalinos**. Sin embargo, hay unos pocos que

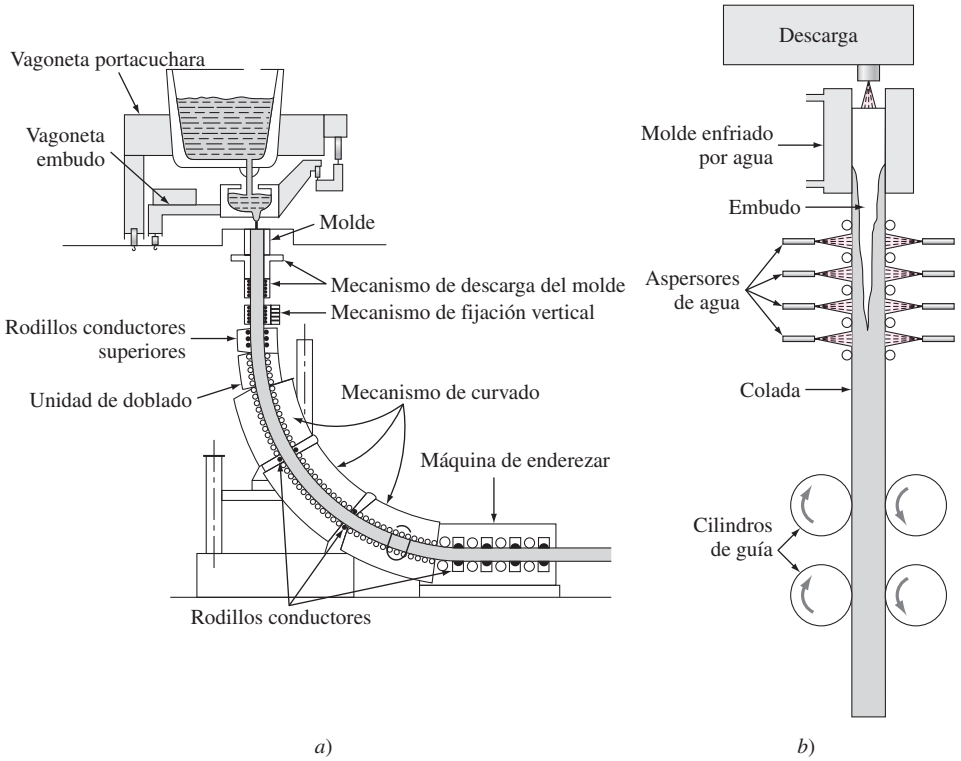
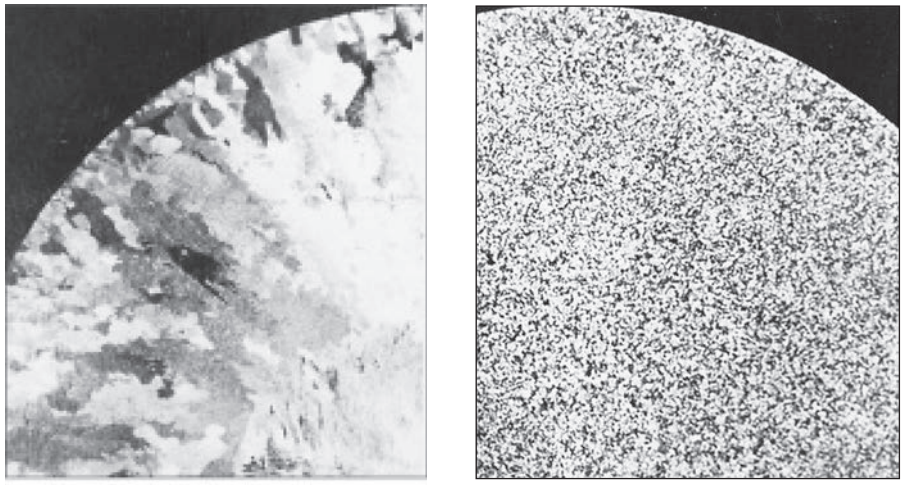


Figura 4.9
Colada en continuo de lingotes de acero. *a*) Esquema general y *b*) primer plano del sistema de moldeo.
(Según "Making, Shaping, and Treating of Steel", 10a. ed., Association of Iron and Steel Engineers", 1985.)

constan de un solo cristal y se llaman *monocristales*. Por ejemplo, los álabes de las turbinas de gas resistentes a termofluencia a altas temperaturas, se fabrican algunas veces como monocristales, como se muestra en la figura 4.11*c*. Los álabes de turbina de monocristal son más resistentes a termofluencia a temperaturas elevadas que los mismos álabes fabricados en estructura de granos equiaxiales (figura 4.11*a*) o en estructuras de granos columnares (figura 4.11*b*), dado que a elevadas temperaturas, por encima de aproximadamente la mitad de la temperatura absoluta de fusión de un metal, los límites de grano se hacen más débiles que el centro de los granos.

Para el crecimiento de los monocristales, la solidificación debe tener lugar alrededor de un único núcleo, de modo que no se nuclee ni crezca ningún otro cristal. Para lograrlo, la temperatura de la interfase sólido-líquido debe ser ligeramente inferior a la temperatura de fusión del sólido, y la temperatura de líquido tiene que superar la de la interfase. Para conseguir este gradiente de temperaturas, el calor latente de solidificación[5] debe conducirse a través del cristal que se está solidificando. La velocidad

[5] El calor latente de solidificación es la energía térmica liberada cuando el metal solidifica.

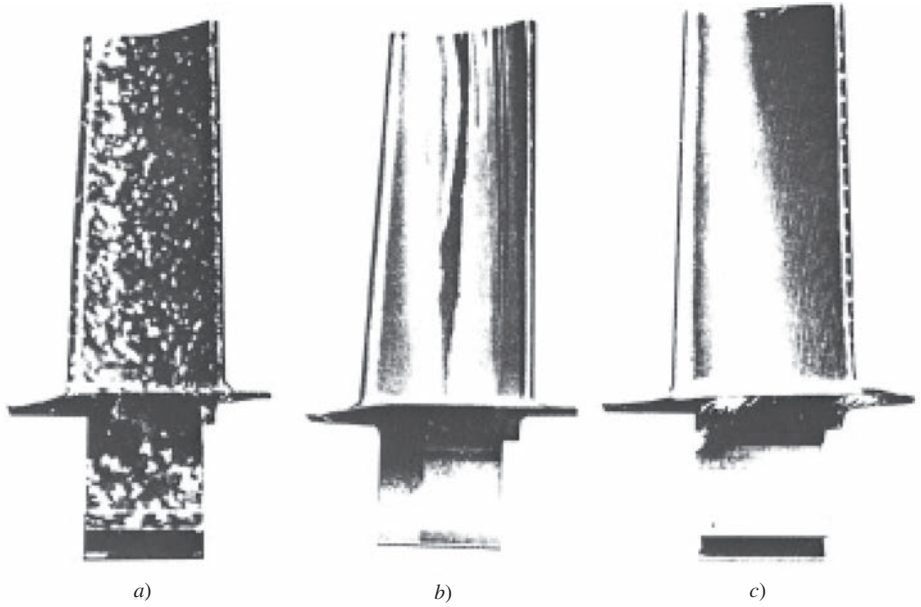


a) *b*)

Figura 4.10
Partes de las secciones transversales de dos lingotes de seis pulgadas de diámetro de aleación 6063 (Al–0.7% Mg–0.4% Si) que han sido obtenidos por colada en semicontinuo. *a*) El corte del lingote se coló sin adición de afinadores de grano; obsérvese los granos columnares y las colonias de cristales en forma de plumas cerca del centro de la sección. *b*) El corte del lingote se coló con adición de afinadores de grano y muestra una estructura de grano fina y equiaxial (reactivo de Tucker, tamaño real).
(Según "Metals Handbook", vol. 8, 8a. ed., American Society for Metals, 1973, p. 164.)

de crecimiento del cristal deberá ser lenta para que la temperatura de la interfase sólido-líquido esté ligeramente por debajo del punto de fusión del sólido que se está solidificando. En la figura 4.12*a* se ilustra cómo se puede obtener un álabe de turbina monocristalina y en la figura 4.12*b* y *c* se muestra cómo el crecimiento competitivo de granos se reduce a un cristal único utilizando un selector de monocristales.

Otro ejemplo de monocristales de utilización industrial son los monocristales de silicio, que se cortan en obleas para chips de circuitos integrados electrónicos en estado sólido (véase la figura 13.1). Los monocristales son importantes en estas aplicaciones, ya que los límites de grano podrían interrumpir el flujo de electrones en dispositivos fabricados con un semiconductor a base de silicio. En la industria se han preparado monocristales de silicio de 8 a 12 pulgadas (20 a 25 cm) de diámetro para aplicaciones en semiconductores. Una de las técnicas más habituales para obtener monocristales de silicio de alta calidad (minimización de defectos) es el método de Czochralski. En este proceso se funde primero silicio policristalino de alta pureza en un crisol inerte y se calienta hasta una temperatura justo por encima del punto de fusión. Se introduce en la masa fundida un monocristal de silicio de alta pureza con la orientación deseada y al tiempo que se hace girar. Parte de la superficie del núcleo cristalino se funde en el líquido, con lo que se suprimen las tensiones externas y queda una superficie adecuada para que el líquido se solidifique sobre ella. El cristal sembrado sigue girando mientras se extrae lentamente la masa fundida. Al sacarlo, el silicio proveniente del



a) *b*) *c*)

Figura 4.11
Álabes de una turbina de gas con diferentes estructuras granulares *a*) Policristalino equiaxial, *b*) policristalino columnar y *c*) monocristal.
(Por cortesía de Pratt & Whitney Co.)

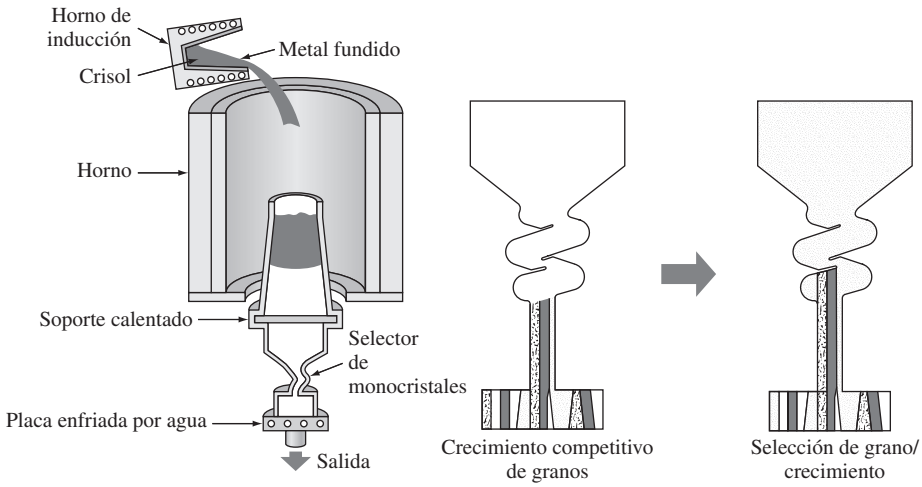


Figura 4.12
a) Esquema del proceso para la producción de álabes monocristalinos para turbina de gas; *b*) Primer plano de la sección de moldeo para producir un álabe monocristalino mostrando el crecimiento competitivo durante la solidificación debajo del selector de monocristales; *c*) El mismo caso que *b*) pero mostrando la supervivencia de un solo grano durante la solidificación a través de un selector de monocristales.
(Según Pratt & Whitney Co.)

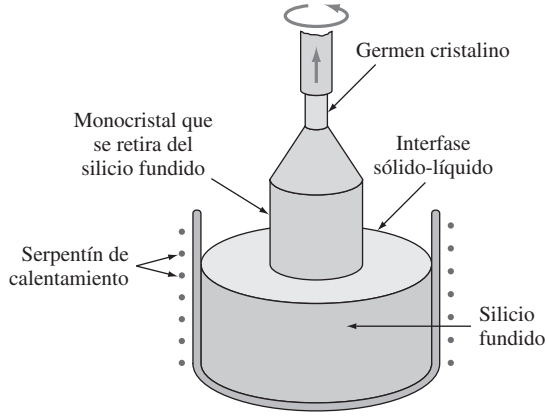


Figura 4.13
Formación de un monocristal de silicio por el proceso de Czochralski.

líquido del crisol se adhiere al núcleo cristalino y comienza a crecer produciéndose un monocristal de silicio de diámetro mucho mayor (figura 4.13). Con este proceso se han obtenido lingotes de monocristales de silicio de aproximadamente 12 pulgadas ($\cong$30 cm) de diámetro.

4.3 SOLUCIONES SÓLIDAS METÁLICAS

Aunque muy pocos metales se utilizan en estado puro, algunos se utilizan en estado casi puro. Por ejemplo, se utiliza cobre de elevada pureza, de 99.99%, para cables eléctricos debido a su muy alta conductividad eléctrica. Se utiliza aluminio de alta pureza (99.99% Al) (llamado *aluminio superpuro*) con fines decorativos porque con él se pueden conseguir superficies pulidas con alto brillo metálico. Sin embargo, la mayoría de los metales utilizados en ingeniería se combinan con otros metales o no metales para conseguir mejor resistencia mecánica, más resistencia a la corrosión u otras propiedades deseadas.

Una *aleación metálica*, o simplemente una **aleación**, es una mezcla de dos o más metales o de un metal (metales) y un no metal (no metales). Las aleaciones pueden tener estructuras relativamente sencillas, como el latón para cartuchos, que es esencialmente una aleación binaria (dos metales) de 70% Cu y 30% Zn. Por otro lado, otras aleaciones pueden ser extremadamente complejas, como la superaleación con base de níquel Inconel 718, utilizada en componentes de motores a reacción y que contiene unos 10 elementos en su composición nominal.

El tipo más sencillo de aleación es el de solución sólida. Una **solución sólida** es un *sólido* que consta de dos o más elementos que están dispersos atómicamente y forman una estructura de una sola fase. En general, hay dos tipos de soluciones sólidas: *sustitucionales* e *intersticiales*.

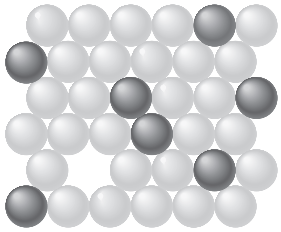


Figura 4.14
Solución sólida sustitucional. Los círculos oscuros representan un tipo de átomo y los blancos otro. El plano de átomo es un plano (111) en una estructura cristalina FCC.

4.3.1 Soluciones sólidas sustitucionales

En las **soluciones sólidas sustitucionales** formadas por dos elementos, los átomos del soluto pueden sustituir a los átomos del disolvente en las posiciones de la red cristalina. En la figura 4.14 se muestra un plano (111) en una unidad cristalina FCC en la que algunos átomos de un elemento en solución, han sustituido a los átomos del elemento solvente, el elemento matriz. La estructura cristalina del elemento mayoritario o disolvente permanece inalterada, pero la red puede distorsionarse por la presencia de los átomos del soluto, particularmente si existe una diferencia importante entre los diámetros atómicos de los átomos de soluto y los del disolvente.

La fracción de átomos de un elemento que pueden disolverse en otro puede variar desde una fracción de 1% atómico hasta 100%. Las siguientes condiciones favorecen una gran solubilidad de un elemento en otro:

1. Los diámetros de los átomos de los elementos no deben diferir mucho más de aproximadamente 15 por ciento.

2. Las estructuras cristalinas de los elementos tienen que ser las mismas.

3. No debe haber diferencias apreciables en las electronegatividades de los dos elementos para evitar que formen compuestos.

4. Los dos elementos deben tener la misma valencia.

Si los diámetros atómicos de los dos elementos que forman la solución sólida son diferentes, provocarán una distorsión en la red cristalina. Dado que la red atómica cristalina puede soportar tan sólo una cantidad limitada de expansión o contracción, existe un límite en la diferencia de los diámetros atómicos en el que la solución sólida puede mantener su estructura. Cuando los diámetros atómicos difieren más de 15%, el "factor del tamaño" se hace desfavorable para que se dé una gran solubilidad en estado sólido.

PROBLEMA DE EJEMPLO 4.2

Con los datos de la tabla siguiente, prediga la solubilidad relativa de los siguientes elementos en el cobre:

a) Zinc *d*) Níquel
b) Plomo *e*) Aluminio
c) Silicio *f*) Berilio

Aplique la escala muy alta, 70-100%, alta, 30-70%; moderada, 10-30%, baja, 1-10%; y muy baja, <1 por ciento.

Elemento	Radio atómico (nm)	Estructura cristalina	Electro-negatividad	Valencia
Cobre	0.128	FCC	1.8	+2
Zinc	0.133	HCP	1.7	+2
Plomo	0.175	FCC	1.6	+2, +4
Silicio	0.117	Cúbica diamante	1.8	+4
Níquel	0.125	FCC	1.8	+2
Aluminio	0.143	FCC	1.5	+3
Berilio	0.114	HCP	1.5	+2

■ Solución

Una muestra de cómo calcular la diferencia de radios atómicos del sistema Cu-Zn, es:

$$\text{Diferencia de un radio atómico} = \frac{\text{radio final} - \text{radio inicial}}{\text{radio inicial}}(100\%)$$

$$= \frac{R_{Zn} - R_{Cu}}{R_{Cu}}(100\%) \qquad \textbf{(4.3)}$$

$$= \frac{0.133 - 0.128}{0.128}(100\%) = +3.9\%$$

Sistema	Diferencia de radio atómico (%)	Diferencia de electronegatividad	Grado de solubilidad en estado sólido relativo previsto	Solubilidad máxima en el estado sólido observada (en %)
Cu–Zn	+3.9	0.1	Alta	38.3
Cu–Pb	+36.7	0.2	Muy baja	0.1
Cu–Si	−8.6	0	Moderada	11.2
Cu–Ni	−2.3	0	Muy baja	100
Cu–Al	+11.7	0.3	Moderada	19.6
Cu–Be	−10.9	0.3	Moderada	16.4

Las predicciones se pueden hacer principalmente con respecto a las diferencias de los radios atómicos. En el caso del sistema Cu-Si, la diferencia de sus estructuras cristalinas es importante. En todos los sistemas las diferencias de electronegatividad son muy pequeñas. Las valencias son todas las mismas, excepto para el Al y el Si. En última instancia, deben tomarse en cuenta los valores experimentales a los que se hace referencia.

Si los átomos de soluto y disolvente tienen la misma estructura cristalina, la solubilidad en estado sólido se ve favorecida. Para que los elementos tengan una solubilidad total en estado sólido en todas las proporciones, deben tener la misma estructura cristalina. Tampoco puede haber una gran diferencia entre las electronegatividades de dos elementos que formen soluciones sólidas, ya que el elemento más electropositivo perdería electrones y el elemento más electronegativo los ganaría, formándose un compuesto. Finalmente, si los dos elementos sólidos tienen la misma valencia, se verá favorecida la solubilidad en estado sólido. Si faltan electrones entre los dos átomos, el enlace entre ellos se verá afectado, lo que creará condiciones desfavorables para la solubilidad en estado sólido.

4.3.2 Soluciones sólidas intersticiales

En las soluciones sólidas intersticiales los átomos del soluto se sitúan en los espacios que hay entre los átomos de disolvente o átomos de la celda. Estos espacios o huecos se denominan *intersticios*. Se pueden formar **soluciones sólidas intersticiales** cuando un átomo es mucho mayor que otro. Ejemplos de átomos que pueden formar soluciones sólidas intersticiales debido a su pequeño tamaño, son: hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno.

Un ejemplo importante de una solución sólida intersticial es la formada por carbono en hierro γFCC, que es estable entre 912 y 1 394°C. El radio atómico del hierro γ es de 0.129 nm, mientras que el del carbono es de 0.075 nm, por lo que existe una diferencia de radios atómicos de 42%. Sin embargo, a pesar de esta diferencia, sólo es posible una solubilidad intersticial máxima del 2.08% de carbono en hierro a 1 148°C. En la figura 4.15*a* se ilustra esquemáticamente este fenómeno, mostrando la distorsión que provocan los átomos de carbono en la red del hierro γ.

El radio del mayor hueco intersticial en el hierro γ FCC es de 0.053 nm (véase el problema de ejemplo 4.3), y dado que el radio del átomo de carbono es de 0.075 nm,

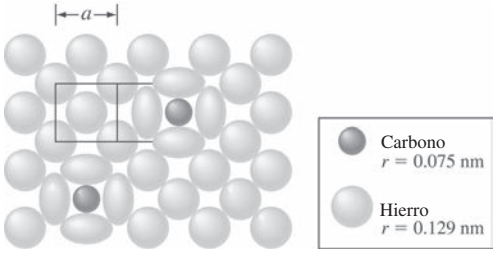


Figura 4.15*a*
Ilustración esquemática de una solución sólida intersticial de carbono en hierro γ FCC justo por encima de 912°C mostrando un plano (100). Obsérvese la distorsión de los átomos de hierro (0.129 nm de radio) en torno de los átomos de carbono (0.075 nm de radio), colocados en los huecos de 0.053 nm de radio.
(Según L. H. Van Vlack, "Elements of Materials Science and Engineering", 4a. ed., Addison-Wesley, 1980, p. 113.)

PROBLEMA DE EJEMPLO 4.3

Calcule el radio del mayor hueco intersticial en la red FCC del hiero γ, sabiendo que el radio atómico del hierro es de 0.129 nm en la estructura FCC, y los mayores huecos intersticiales se encuentran en las posiciones $(\frac{1}{2}, 0, 0)$, $(0, \frac{1}{2}, 0)$, $(0, 0, \frac{1}{2})$, etcétera.

■ Solución

En la figura 4.15*b* se muestra un plano (100) de la red FCC en el plano *yz*. Si se indica por *R* el radio de un átomo de hierro y por *r* el del hueco intersticial en la posición $(0, \frac{1}{2}, 0)$ según la figura 4.15*b*, se tendrá

$$2R + 2r = a \tag{4.4}$$

Del mismo modo, a partir de la figura 4.15*b*,

$$(2R)^2 = (\tfrac{1}{2}a)^2 + (\tfrac{1}{2}a)^2 = \tfrac{1}{2}a^2 \tag{4.5}$$

Despejando *a*, se tiene que

$$2R = \frac{1}{\sqrt{2}}a \qquad \text{o} \qquad a = 2\sqrt{2}R \tag{4.6}$$

Combinando las ecuaciones 4.4 y 4.6, se obtiene

$$\begin{aligned} 2R + 2r &= 2\sqrt{2}R \\ r &= (\sqrt{2} - 1)R = 0.414R \\ &= (0.414)(0.129\ \text{nm}) = 0.053\ \text{nm} \blacktriangleleft \end{aligned}$$

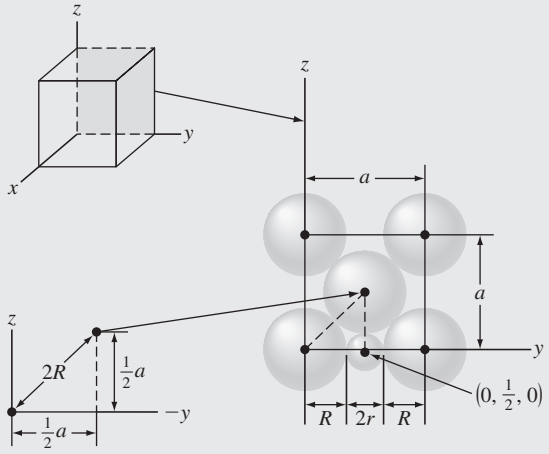


Figura 4.15*b*
Plano (100) de la red FCC conteniendo un átomo intersticial en la posición de coordenadas $(0, \frac{1}{2}, 0)$.

no es sorprendente que la solubilidad máxima del carbono en hierro γ sea tan sólo de 2.08%. En el hierro α BCC, el radio del mayor hueco intersticial es solamente de 0.036 nm, de lo que resulta que por debajo de 723°C solamente 0.025% de carbono puede disolverse en forma intersticial.

4.4 IMPERFECCIONES CRISTALINAS

En realidad, no existen cristales perfectos pues contienen varios tipos de defectos que afectan a muchas de las propiedades físicas y mecánicas, que a su vez afectan a muchas propiedades importantes de los materiales para ingeniería, como la conformación en frío de aleaciones, la conductividad eléctrica de semiconductores, la velocidad de migración de los átomos en aleaciones y la corrosión de los metales.

Las imperfecciones en la red cristalina se clasifican según su forma y geometría. Los tres grupos principales son: 1) defectos puntuales o de dimensión cero, 2) defectos de línea o de una dimensión (dislocaciones) y 3) defectos de dos dimensiones que incluyen superficies externas y superficies de límite de grano. Los defectos macroscópicos tridimensionales o de volumen también pueden incluirse. Ejemplos de estos defectos, son: poros, fisuras e inclusiones.

4.4.1 Defectos puntuales

El defecto puntual más sencillo es la vacante, un sitio atómico en el que ha desaparecido el átomo que lo ocupaba (figura 4.16*a*). Las **vacantes** pueden producirse durante la solidificación como resultado de perturbaciones locales durante el crecimiento de los cristales, o por las reordenaciones atómicas en un cristal ya existente debido a la movilidad de los átomos. En los metales, la concentración de vacantes en el equilibrio, raramente excede de aproximadamente 1 átomo en 10 000. Las vacantes en metales son defectos en equilibrio y su energía de formación es aproximadamente de 1 eV.

En los metales pueden introducirse vacantes adicionales durante la deformación plástica, por enfriamiento rápido desde elevadas a bajas temperaturas y por bombardeo con partículas de alta energía, como son los neutrones. Las vacantes que no están en equilibrio tienen tendencia a formar " aglomerados", formando divacantes o triva-

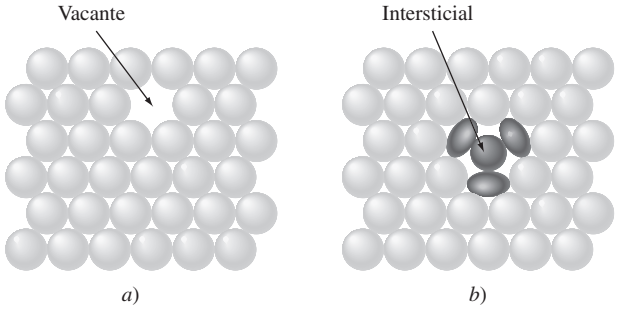


Figura 4.16
a) Vacante. *b*) Intersticial o autointersticial, defectos puntuales en una red metálica compacta.

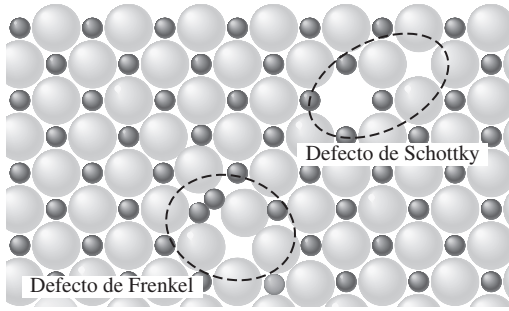


Figura 4.17
Representación en dos dimensiones de un cristal iónico ilustrando un defecto de Schottky y un defecto de Frenkel.
(Según Wulff et al., "Structure and Properties of Materials", vol. 1: "Structure, Wiley, 1964, p. 78.)

cantes. Las vacantes pueden moverse intercambiando su posición con sus vecinas. Este proceso es importante en la migración o difusión de los átomos en estado sólido, particularmente, a temperaturas elevadas donde la movilidad de los átomos es mayor.

Algunas veces un átomo de un cristal puede ocupar un hueco intersticial entre los átomos de su entorno que ocupan posiciones atómicas normales (figura 4.16*b*). Este tipo de defectos puntuales se llama **autointersticial** o **intersticialidad**. Estos defectos no ocurren generalmente de forma natural por la distorsión estructural que provocan, pero se pueden introducir en la estructura por irradiación.

En cristales iónicos los defectos puntuales son más complejos debido a la necesidad de mantener la neutralidad eléctrica. Cuando dos iones de carga opuesta faltan en un cristal iónico, se crea una divacante aniónica-catiónica que se conoce como **defecto de Schottky** (figura 4.17). Si un catión se mueve a un hueco intersticial del cristal iónico, se crea una vacante catiónica en la posición inicial del catión. Este par de defectos vacante-intersticio se llama **defecto de Frenkel**[6] (figura 4.17). La presencia de estos defectos en los cristales iónicos, aumenta su conductividad eléctrica.

Los átomos de impurezas de tipo sustitucional o intersticial son también defectos puntuales y se pueden presentar en cristales con enlaces metálicos o covalentes. Por ejemplo, cantidades muy pequeñas de impurezas atómicas sustitucionales en silicio puro, pueden afectar mucho su conductividad eléctrica para su uso en dispositivos electrónicos. Las impurezas iónicas son también defectos puntuales en cristales iónicos.

4.4.2 Defectos lineales (dislocaciones)

Los defectos lineales o **dislocaciones** en los sólidos cristalinos son defectos que provocan una distorsión de la red centrada en torno a una línea. Las dislocaciones se crean

[6] Yakov Ilych Frenkel (1894-1954). Físico ruso que estudió los defectos en los cristales. Su nombre se asocia con el defecto vacante-intersticio que se encuentra en algunos cristales iónicos.

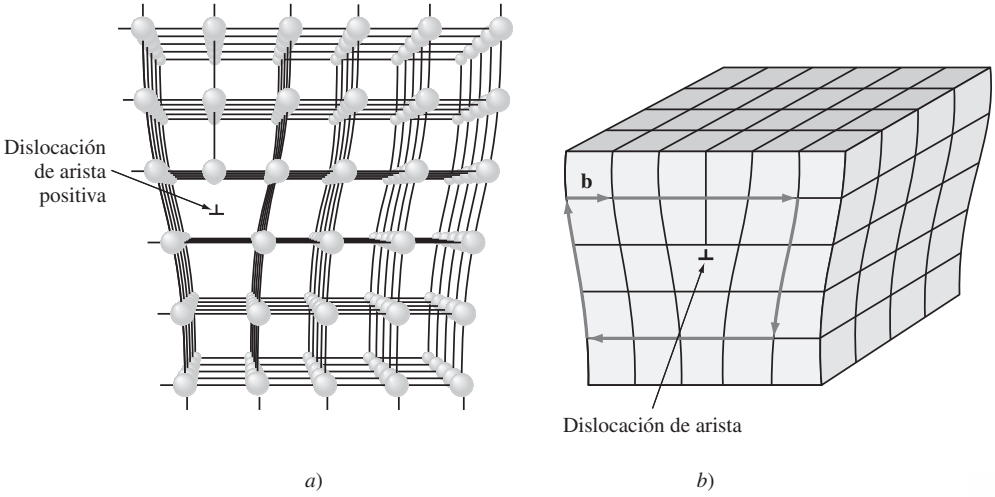


Figura 4.18
a) Dislocación de arista positiva en una red cristalina. El defecto lineal está justo encima de la "te" invertida, ⊥, donde se ha insertado un medio plano adicional de átomos.
(Según A. G. Gay, "Essentials of Materials Science", McGraw-Hill, 1976, p. 153.)
b) Dislocación de arista que indica la orientación de su vector de Burgers o de deslizamiento **b**.
(Según M. Eisenstadt, "Introduction to Mechanical Properties of Material", Macmillan, 1971, p. 117.)

Animación

durante la solidificación de los sólidos cristalinos. También se pueden formar en la deformación plástica o permanente de los sólidos cristalinos, por condensación de vacantes y por desajuste atómico en las disoluciones sólidas.

Los dos principales tipos de dislocaciones son las de tipo de *arista* y las de tipo *helicoidal*. Una combinación de las dos da *dislocaciones mixtas*, que tienen componentes de arista y helicoidales. Una dislocación de arista se crea en un cristal por la intersección de un medio plano adicional de átomos, como se muestra en la figura 4.18*a*, justo encima del símbolo ⊥. La "te" invertida, ⊥, indica una dislocación de arista positiva mientras que la "te" normal, ⊤, indica una dislocación de arista negativa.

La distancia del desplazamiento de los átomos alrededor de la dislocación se llama *deslizamiento* o *vector de Burgers* **b** y es *perpendicular* a la línea de dislocación de arista (figura 4.18*b*). Las dislocaciones son defectos de no equilibrio y almacenan energía en la región distorsionada de la red cristalina alrededor de la dislocación. La dislocación de arista presenta una región de tensión o compresión donde se encuentra el medio plano adicional y una región de esfuerzo a la tensión debajo del medio plano adicional de átomos (figura 4.19*a*).

La dislocación helicoidal puede formarse en un cristal perfecto aplicando esfuerzos cortantes hacia arriba y hacia abajo en las regiones del cristal perfecto que han sido separadas por un plano cortante, como se muestra en la figura 4.20*a*. Estos esfuerzos cortantes introducen en la estructura cristalina una región de distorsión en forma de una rampa en espiral de átomos distorsionados o dislocación helicoidal (figura 4.20*b*). La región distorsionada del cristal no está bien definida y tiene cuando menos varios

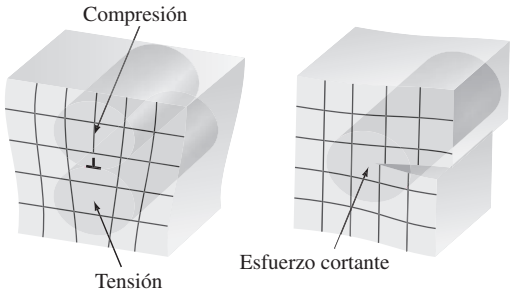


Figura 4.19
Campos de tensión alrededor de *a*) una dislocación de arista y *b*) una dislocación helicoidal.
(Según John Wulff et al., "The Structure and Properties of Materials", vol. 3: "Mechanical Behavoir", Wiley, 1965, p. 69.)

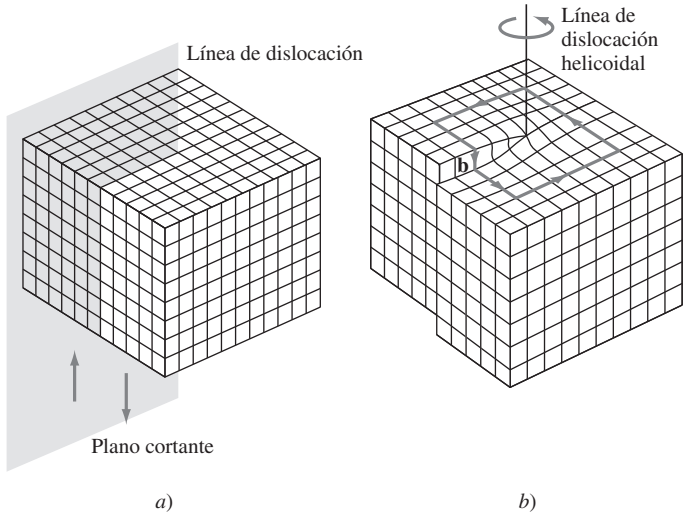


Figura 4.20
Formación de una dislocación helicoidal. *a*) Un cristal perfecto es cortado por un plano y se aplican esfuerzos cortantes paralelos al plano del corte arriba y abajo formando una dislocación en helicoidal en *b*). *b*) Se presenta una dislocación helicoidal con su deslizamiento o vector de Burgers **b** paralelo a la línea de dislocación.
(Según M. Eisenstadt, "Mechanical Properties of Materials", Macmillan, 1971, p. 118.)

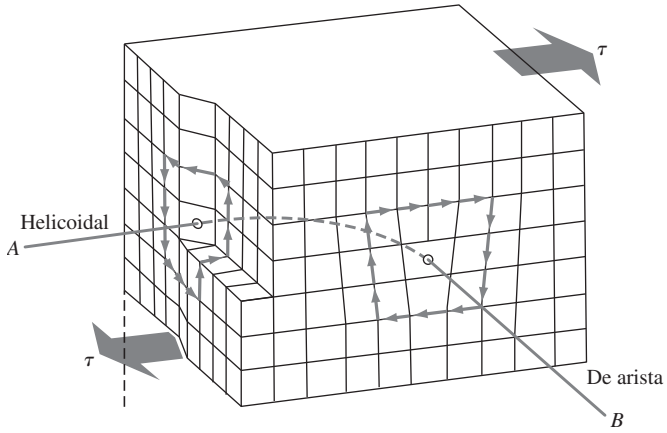


Figura 4.21
Dislocaciones mixtas en un cristal. La línea de dislocación *AB* es del tipo helicoidal pura cuando entra en el cristal a la izquierda y del tipo arista pura cuando deja el cristal a la derecha.
(Según John Wulff et al., "Structure and Properties of Materials", vol. 3: "Mechanical Properties", Wiley, 1965, p. 65.)

átomos de diámetro. De esta manera se crea una región de esfuerzo cortante alrededor de la dislocación helicoidal en la que se almacena energía (figura 4.19*b*). El deslizamiento o vector de Burgers de la dislocación helicoidal es *paralelo* a la línea de dislocación, como se muestra en la figura 4.20*b*.

La mayoría de las dislocaciones en los cristales son de tipo mixto, y tienen componentes de arista y helicoidales. En la línea de dislocación curvada *AB* de la figura 4.21, la dislocación es de tipo helicoidal puro a la izquierda por donde entra en el cristal y de tipo de arista pura a la derecha por donde deja al cristal. En el interior del cristal, la dislocación es de tipo mixto, con componentes en arista y helicoidales.

4.4.3 Defectos planares

Los defectos planares incluyen superficies externas, **límites de grano**, **maclas**, **bordes de ángulo cerrado**, **bordes de ángulo abierto**, **torsiones** y **fallas de apilamiento**. La superficie libre o externa de cualquier material es el tipo más común de defecto planar. Las superficies externas se consideran defectos debido a que los átomos de la superficie están enlazados a otros átomos sólo por un lado. Por consiguiente, los átomos de la superficie tienen un menor número de vecinos. Como resultado de ello, estos átomos tienen un mayor estado de energía en comparación con los átomos situados dentro del cristal, con un número óptimo de vecinos. La mayor energía asociada con los átomos de la superficie de un material hace a la superficie susceptible a la erosión y a reaccionar con elementos del ambiente. Este punto ilustra con mayor claridad la importancia de los defectos en el desempeño de los materiales.

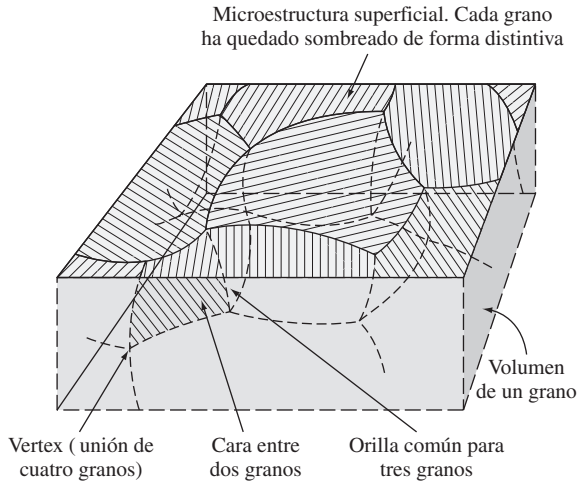


Figura 4.22
Esquema que representa la relación entre la microestructura superficial de un material cristalino y la red tridimensional. Solamente se muestran partes del volumen total y de la cara total de un cierto grano.
(Según A. G. Guy, "Essentials of Materials Science", McGraw-Hill, 1976.)

Los límites de grano son los defectos de la superficie en los materiales policristalinos que separan a los granos (cristales) de diferentes orientaciones. En los metales, los límites de grano se originan durante la solidificación, cuando los cristales formados desde diferentes núcleos crecen simultáneamente juntándose unos con otros (figura 4.2). La forma de los límites de grano está determinada por la restricción impuesta por el crecimiento de los granos vecinos. En la figura 4.22 se presentan esquemáticamente las superficies de los límites de grano de una estructura de grano aproximadamente equiaxial, y los granos reales se presentan en la figura 4.3.

El límite de grano es una región estrecha entre dos granos de entre dos y cinco diámetros atómicos de ancho, y es una región de átomos no alineados entre dos granos adyacentes. El ordenamiento atómico en los límites de grano es menor que en los granos debido a esta falta de orden. Los límites de grano tienen también algunos átomos en posiciones pensionadas, lo que provoca un aumento de energía en la región del límite de grano.

Entre mayor sea la energía en los límites de grano y su estructura sea más abierta, éstos se convertirán en una región más favorable para la nucleación y el crecimiento de precipitados (véase sección 9.5). El menor orden atómico en los límites de granos también permite una difusión atómica más rápida en esas regiones. A temperatura ordinaria, los límites de grano disminuyen la plasticidad dificultando el movimiento de dislocación en la región del límite de grano.

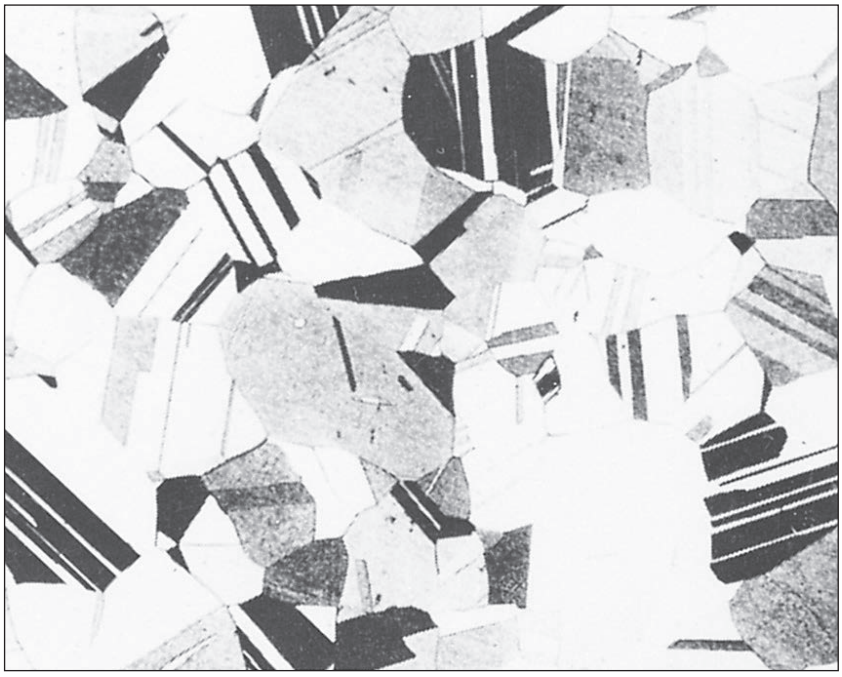


Figura 4.23
Maclas en la estructura de grano del latón.

Laboratorio virtual

Las *maclas* o *bordes de maclas* son otro ejemplo de un defecto bidimensional. Una macla se define como una región en la que existe una imagen de espejo de la estructura a través de un plano o un borde. Los bordes gemelos se forman cuando un material se deforma permanentemente o de manera plástica *(macla de deformación*). También pueden aparecer durante el proceso de recristalización en el que los átomos se vuelven a situar en un cristal deformado (*macla de templado*), pero esto sólo ocurre en algunas aleaciones FCC. En la figura 4.23 se muestran varias maclas de templado en la microestructura del latón. Como el nombre lo indica, las maclas se forman en pares. De manera similar a las dislocaciones, los bordes gemelos tienden a reforzar a un material. En la sección 6.5 se da una explicación más pormenorizada de los límites de macla.

Cuando en un arreglo de dislocaciones de borde éstas se orientan en un cristal de manera tal que dos regiones del cristal parecen desorientarse o inclinarse (figura 4.24*a*), se forma un defecto bidimensional llamado *límite de inclinación en ángulo agudo*. Puede ocurrir un fenómeno similar cuando una red de dislocaciones helicoidales crea un límite de torsión en ángulo agudo (figura 4.24*b*). El ángulo de desorientación θ de un límite de ángulo agudo suele ser menor a 10 grados. A medida que aumenta la densidad de las dislocaciones en los límites en ángulo agudo (inclinación o torsión), aumenta el ángulo de desorientación θ. Si θ es mayor a 20 grados, el límite ya no se caracteriza como de ángulo agudo, sino como un límite general de grano. De manera similar a las dislocaciones y las maclas, los bordes de ángulo agudo son regio-

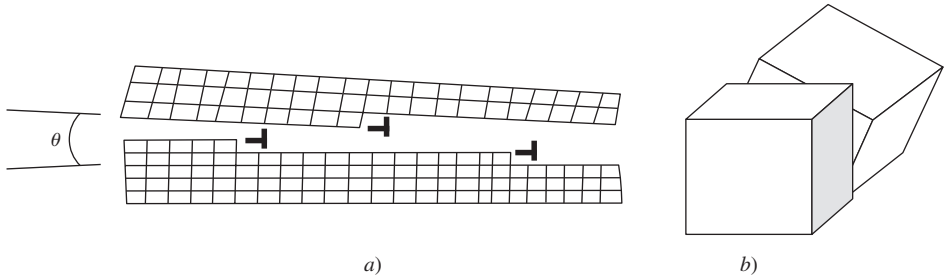


Figura 4.24
a) Dislocaciones de borde en un haz que forma un límite inclinado en un ángulo pequeño. *b*) Esquema de límite doblado en ángulo pequeño.

nes de alta energía debido a las distorsiones locales de la red y tienden a endurecer a un metal.

En la sección 3.8 se expuso la formación de las estructuras cristalinas FCC y HCP mediante el apilamiento de los planos atómicos. Se señaló que la secuencia de apilamiento *ABABAB*… lleva a la formación de una estructura cristalina HCP, mientras que la secuencia *ABCABABC*… lleva a una estructura FCC. En ocasiones, durante el crecimiento de un material cristalino, en el colapso de un grupo de átomos vacante, o en la interacción de dislocaciones, pueden faltar uno o más planos de apilamiento, lo que da lugar a otro defecto bidimensional llamado *falla de apilamiento*. Las fallas de apilamiento *ABCABA**A**C**B**ABC* y *ABA**A**B**B**AB* son típicas en los cristales FCC y HCP, respectivamente. Los planos en negritas indican las fallas. Las fallas de apilamiento también tienden a endurecer al material.

Es importante señalar que, en términos generales, de los defectos bidimensionales expuestos aquí, los límites de grano son los más eficaces para endurecer a un metal; sin embargo, las fallas de apilamiento, los límites de macla y los límites en ángulo agudo también sirven para un propósito similar. El motivo por el cual estos defectos tienden a endurecer a un metal se expondrá con mayor detalle en el capítulo 6.

4.4.4 Defectos volumétricos

Los *defectos volumétricos* o *tridimensionales* se forman cuando un grupo de átomos o de defectos puntuales se unen para formar un vacío tridimensional o poro. De manera inversa, un grupo de átomos de alguna impureza puede unirse para formar un precipitado tridimensional. El tamaño de un defecto volumétrico puede variar desde unos cuantos nanómetros hasta centímetros o, en ocasiones, puede ser mayor. Los defectos tienen un efecto o influencia considerable en el comportamiento y desempeño de un material. Finalmente, el concepto de un defecto tridimensional o volumétrico puede ampliarse a una región amorfa dentro de un material policristalino. Esos materiales se expusieron brevemente en el capítulo 3 y se expondrán con mayor amplitud en capítulos siguientes.

4.5 TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA LA IDENTIFICACIÓN DE MICROESTRUCTURAS Y DEFECTOS

Los especialistas en ciencia e ingeniería de los materiales emplean diversos instrumentos para estudiar y entender el comportamiento de los materiales con base en sus microestructuras, defectos, microconstituyentes y otras características concretas de la estructura interna. Los instrumentos revelan información sobre la constitución y estructura internas de los materiales a varias escalas de longitud, que varían en el intervalo de micro a nano. En este intervalo, pueden estudiarse por medio de distintos instrumentos la estructura de los granos, los límites de grano, las diversas microfases, los defectos lineales, los defectos de superficie y su efecto sobre el comportamiento de los materiales. En las siguientes secciones se expondrá la aplicación de las técnicas de metalografía óptica, la microscopia electrónica de barrido, la microscopia electrónica de transmisión, la microscopia electrónica de transmisión de alta resolución, y la microscopia de sondeo de barrido para aprender sobre las características internas y superficiales de los materiales.

4.5.1 Metalografía óptica, tamaño de grano según la ASTM y determinación del diámetro de grano

Laboratorio virtual

Las técnicas de metalografía óptica se emplean para estudiar las características y constitución interna de los materiales a escala micrométrica (nivel de aumento de alrededor de 2000X). Mediante la aplicación de las técnicas de metalografía óptica puede extraerse información cualitativa y cuantitativa en relación con el tamaño de los granos, los límites de grano, la existencia de diversas fases, daño interno y algunos defectos. En esta técnica, la superficie de una pequeña muestra de material, por ejemplo un metal o un material cerámico, se prepara primero mediante un procedimiento pormenorizado y más bien prolongado. El proceso de preparación incluye numerosas etapas de molienda de la superficie (por lo general, cuatro) que quitan grandes rayones y capas delgadas deformadas plásticamente. La etapa de molienda es seguida por varias etapas de pulido (por lo general, cuatro) que quitan los rayones finos formados durante la etapa de molienda. La calidad de la superficie es muy importante para el resultado del proceso y, en términos generales, debe producirse al final de la etapa de pulido una superficie como de espejo sin rayones. Estos pasos son necesarios para minimizar el contraste topográfico. La superficie pulida se expone entonces a un ataque químico. La elección del reactivo atacante y el tiempo de exposición (el periodo en que la muestra permanecerá en contacto con el activo de ataque) son dos factores fundamentales que dependen del material concreto que se esté estudiando. Los átomos en el límite de grano serán atacados mucho más rápidamente por el reactivo de ataque que los átomos que están dentro del grano. Ello se debe a que los átomos que están en el límite de grano poseen un mayor estado de energía dado su ordenamiento menos eficiente. Como resultado, el reactivo de ataque produce diminutas cavidades a lo largo de los límites de los granos. La muestra preparada se examina a continuación con un microscopio metalúrgico (microscopio invertido) que se basa en la luz visible incidente. En la figura 4.25 se muestra la representación esquemática de un microscopio metalúrgi-

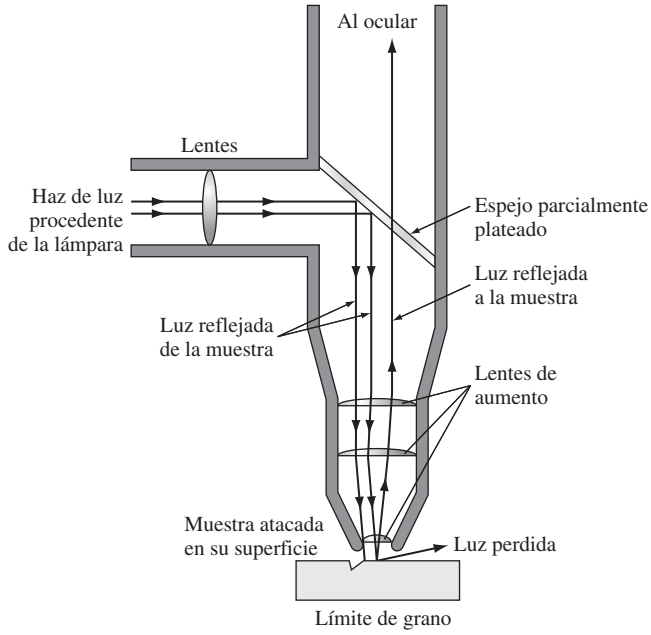


Figura 4.25
Diagrama esquemático que ilustra cómo la luz es reflejada en la superficie de un metal pulido y atacado. La superficie irregular del límite de grano no refleja la luz.
(Según M. Eisenstadt, "Mechanical Properties of Materials", Macmillan, 1971, p. 126.)

Laboratorio virtual

co. Cuando se exponen a la luz incidente en un microscopio óptico, estas cavidades no reflejan la luz tan intensamente como el resto del material granulado (figura 4.26). Debido a la menor reflexión de luz, las diminutas cavidades aparecen como líneas oscuras, revelando así los límites del grano (figura 4.27). Además, las impurezas, las otras fases existentes y los defectos internos reaccionan de manera distinta al reactivo de ataque y se revelan en fotomicrografías tomadas de la superficie de la muestra. En general, esta técnica brinda una gran cantidad de información cuantitativa sobre el material.

Además de la información cuantitativa que se extrae de las fotomicrografías, también puede obtenerse determinada información cuantitativa limitada. Pueden determinarse el tamaño de grano y el diámetro medio de grano del material por medio de microfotografías obtenidas con esta técnica.

El tamaño de grano de los metales policristalinos es importante dado que la cantidad de superficie de los límites de grano tiene un efecto significativo en muchas propiedades de los metales, especialmente en la resistencia mecánica. A bajas temperaturas (inferiores a la mitad de su temperatura de fusión) los límites de grano endurecen a los metales por restricción bajo tensión del movimiento de las dislocaciones. A temperaturas elevadas, los límites de grano pueden deslizarse y convertirse en regiones de debilidad en los metales policristalinos.

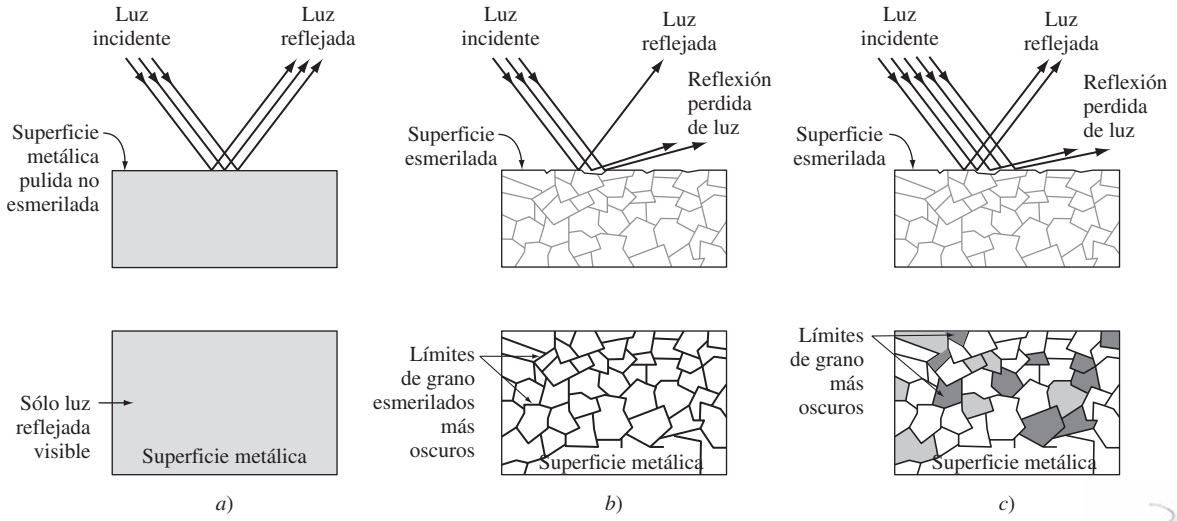


Figura 4.26
Efecto del ataque de una superficie pulida de una muestra de acero sobre la microestructura observada en el microscopio óptico. *a*) En la muestra pulida no se observa la microestructura característica. *b*) Después del ataque de un acero muy bajo en carbono, solamente se han atacado de manera importante los límites de grano y aparecen como líneas oscuras en la microestructura óptica. *c*) Después del ataque de una muestra pulida de un acero medio en carbono, en la microestructura se observan dos regiones, una oscura (perlita) y otra clara (ferrita). La perlita oscura ha sido más fuertemente atacada por el reactivo y por lo tanto no refleja mucha luz.

Laboratorio virtual

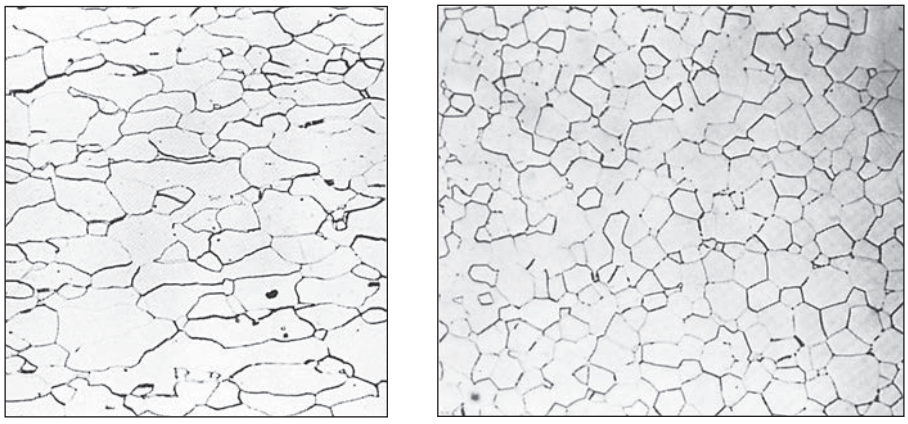


Figura 4.27
Límites de grano en las superficies de muestras pulidas y atacadas como se revelan en el microscopio óptico. *a*) Acero de bajo carbono (ampliación 100×).
(Según "Metals Handbook", vol. 7, 8a. ed., American Society for Metals, 1972, p. 4.)
b) Óxido de magnesio (ampliación 225×).
[*Según R. E. Gardner y G. W. Robinson, J. Am. Ceram. Soc., 45:46 (1962.)*]

Un método para medir el tamaño de grano es el de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM), en el que el **número de tamaño de grano** *n* se define por

$$N = 2^{n-1} \tag{4.7}$$

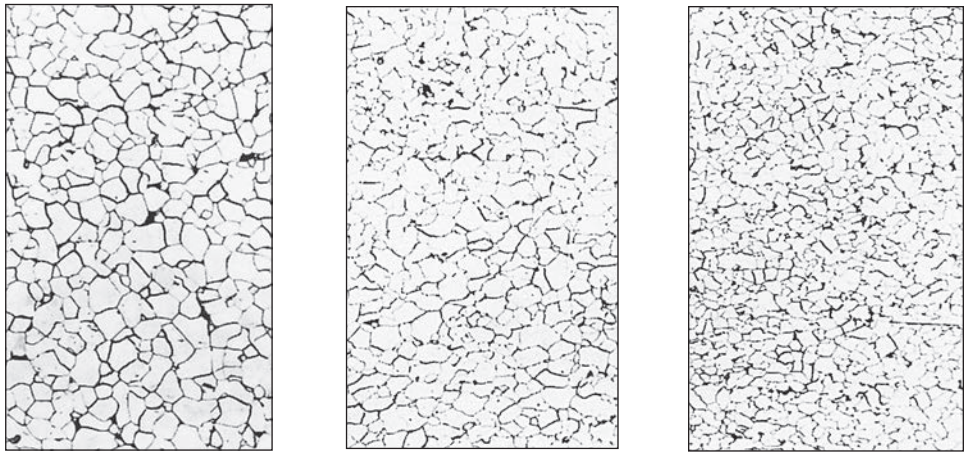
donde *N* es el número de granos por pulgada cuadrada en la superficie de un material pulida y atacada, a un aumento de 100×, y *n* es un número entero definido como el *número de tamaño de grano ASTM*. En la tabla 4.2 se reconocen los números de tamaño de grano con el número nominal de granos por pulgada cuadrada a 100× y granos por milímetro cuadrado 1×. En la figura 4.28 se muestran ejemplos de algunos tamaños de grano nominales para muestras de chapa de un acero bajo en carbono. En

Laboratorio virtual
Tutorial

Tabla 4.2 Tamaño de grano ASTM

	Número nominal de granos	
Número de tamaño de grano	**Por mm al cuadrado a 1×**	**Por pulgada cuadrada 100×**
1	15.5	1.0
2	31.0	2.0
3	62.0	4.0
4	124	8.0
5	248	16.0
6	496	32.0
7	992	64.0
8	1 980	128
9	3 970	256
10	7 940	512

Fuente: "Metals Handbook," vol. 7, 8a. ed., American Society for Metals, 1972, p. 4.



a) *b*) *c*)

Figura 4.28
Algunos tamaños de grano ASTM de láminas de acero bajo en carbono: *a*) núm. 7; *b*) núm. 8 y *c*) núm. 9. (Ataque: nital; ampliación 100×.)
(Según: "Metals Handbook" vol. 7, 8a. ed., American Society for Metals, 1972, p. 4.)

términos generales, un material puede clasificarse como de grano tosco cuando $n < 3$; de grano medio, $4 < n < 6$; de grano fino $7 < n < 9$, y de grano ultrafino, $n > 10$.

Un enfoque más directo para evaluar el tamaño de grano de un material sería determinar el promedio real del diámetro de grano. Esto ofrece grandes ventajas con respecto al número de tamaño de grano de la ASTM, número que en realidad no ofrece ninguna información directa sobre el tamaño real del grano. En este enfoque, una vez preparada una fotomicrografía a un aumento determinado, se traza en la fotomicrografía una línea aleatoria de longitud conocida. Se determina entonces el número de granos que interseca esta línea, y también el cociente del número de granos en relación con la longitud real de la línea, n_L. El diámetro medio de grano d se determina aplicando la ecuación

$$d = C/(n_L M) \tag{4.8}$$

donde C es una constante ($C = 1.5$ para las microestructuras típicas) y M es el aumento al cual se toma la fotomicrografía.

PROBLEMA DE EJEMPLO 4.4

Se realiza una determinación de tamaño de grano ASTM mediante una micrografía de un metal a 100× aumentos. ¿Cuál es el número de tamaño de grano ASTM del metal si tienen 64 granos por pulgada cuadrada?

Tutorial

■ Solución

$$N = 2^{n-1}$$

donde N = número de granos por pulgada cuadrada a 100×
n = número de tamaño de grano ASTM

Así:

$$64 \text{ granos/pulg}^2 = 2^{n-1}$$
$$\log 64 = (n - 1)(\log 2)$$
$$1.806 = (n - 1)(0.301)$$
$$n = 7 \blacktriangleleft$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 4.5

Si se tienen 60 granos por pulgada cuadrada en la micrografía a ×200, ¿cuál es el número ASTM de tamaño de grano de este metal?

■ Solución

Si se tienen 60 granos por pulgada cuadrada a ×200, a ×100 se tendrá

$$N = \left(\frac{200}{100}\right)^2 (60 \text{ granos/pulg}^2) = 240 = 2^{n-1}$$
$$\log 240 = (n - 1)(\log 2)$$
$$2.380 = (n - 1)(0.301)$$
$$n = 8.91 \blacktriangleleft$$

Obsérvese que la relación en el cambio de aumentos tiene que estar elevada al cuadrado, dado que se refiere al número de granos por pulgada cuadrada.

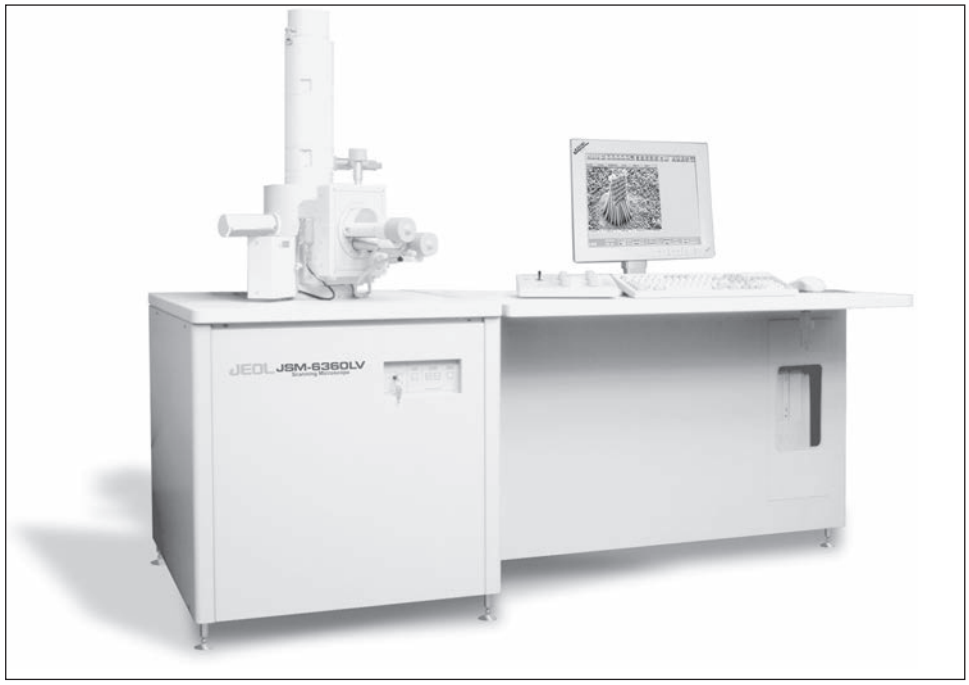


Figura 4.29
Fotografía de un microscopio electrónico de barrido. Obsérvese la columna (que se evacua durante el uso) a la izquierda y la pantalla de observación a la derecha.
(Por cortesía de JEOL USA, INC.)

4.5.2 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido es una herramienta muy importante en la ciencia de materiales y en la ingeniería; se utiliza para medir las características microscópicas, la clasificación de las fracturas, los estudios de la microestructura, las evaluaciones de los recubrimientos de poco espesor, el examen de la contaminación de la superficie y el análisis de fallas en los materiales. En contraposición a la microscopia óptica en la cual la superficie es expuesta a la luz visible incidente, el microscopio electrónico de barrido (SEM) dirige un haz de electrones enfocado a un punto de la superficie de una muestra a analizar y recoge y muestra las señales electrónicas emitidas por la muestra. La figura 4.29 es la fotografía de un modelo reciente de microscopio electrónico de barrido y la figura 4.30 ilustra esquemáticamente los principios de su manejo. Básicamente, un cañón de electrones produce un haz de electrones en una columna al vacío que es dirigido y enfocado sobre un pequeño punto de la muestra. Las bobinas de barrido permiten al haz barrer una pequeña área de la superficie de la muestra. Los electrones con un ángulo pequeño de dispersión interactúan con las protuberancias de la superficie y generan una dispersión de electrones secundarios[7] que producen una señal electrónica que a su vez produce una imagen con una profun-

[7] Los electrones secundarios son electrones emitidos por los átomos del metal blanco después de haber sido bombardeados por los electrones primarios procedentes del haz de electrones.

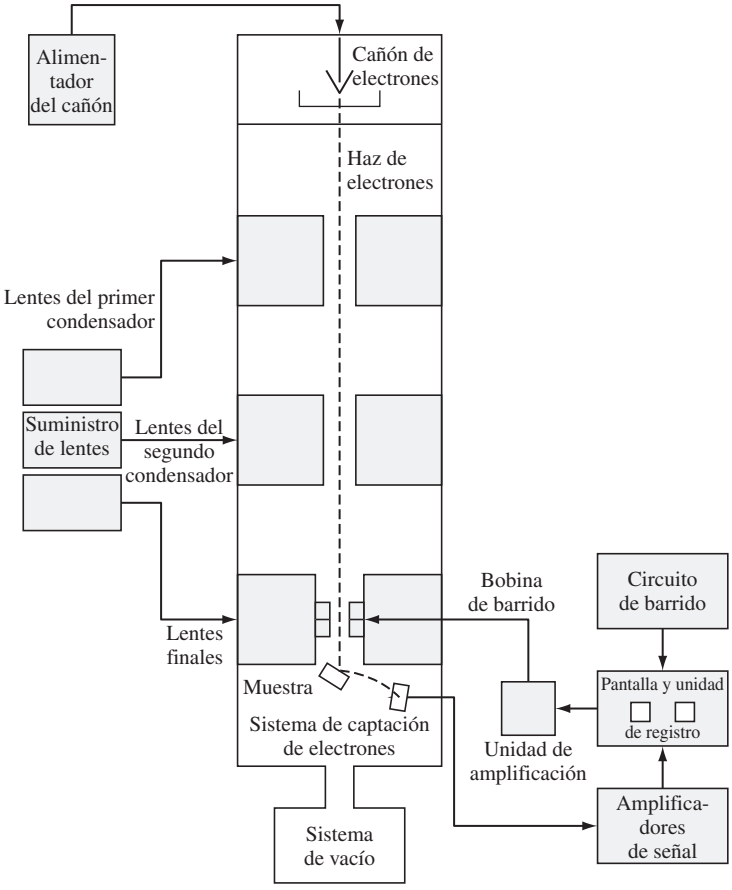


Figura 4.30
Diagrama esquemático del diseño básico de un microscopio electrónico de barrido.
(Según V. A. Phillips, "Modern Metallographic Techniques and Their Applications", Wiley, 1971, p. 425.)

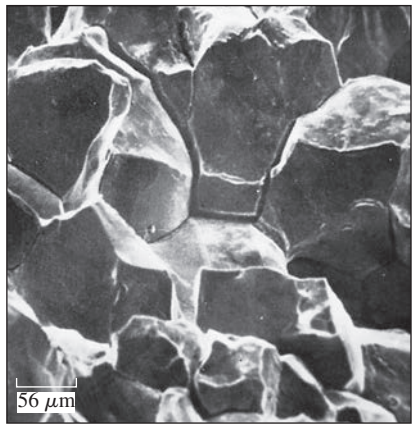


Figura 4.31
Fractografía electrónica de barrido de una fractura por corrosión intergranular cercana a la soldadura circular en un tubo de pared gruesa de acero inoxidable tipo 304. (Ampliación ×180.)
(Según "Metals Handbook", vol. 9: "Fractography and Atlas of Fractographs", 8a. ed., American Society for Metals, 1974, p. 77.)

didad de campo de aproximadamente unas 300 veces superior a la del microscopio óptico (sobre 10 μm a 10 000 diámetros de aumento). La resolución de la mayoría de instrumentos SEM es de alrededor de 5 nm, con un amplio intervalo de amplificación (entre 15 a 100 000×).

La SEM es particularmente útil en análisis de materiales y para la observación de superficies fracturadas de los metales. La figura 4.31 muestra una fractografía hecha con SEM de una fractura ocasionada por corrosión intergranular. Obsérvese cómo están claramente delimitadas las superficies de los granos del metal y la sensación de profundidad. Las fractografías hechas por SEM se utilizan para determinar cuándo una superficie fracturada es intergranular (a lo largo del límite de grano), transgranular (a través del límite de grano), o una mezcla de ambas. Las muestras que se analizan empleando el SEM normal suelen estar recubiertas de oro u otros metales pesados para lograr una mejor resolución y calidad de la señal. Esto es de particular importancia si la

Figura 4.32
Fotografía de un microscopio electrónico de transmisión moderno.
(Por cortesía de JEOL USA, INC.)

muestra está compuesta por un material no conductor. También puede obtenerse información cualitativa y cuantitativa en relación con la composición de la muestra cuando el SEM está equipado con un espectrómetro de rayos X.

4.5.3 Microscopia electrónica de transmisión (TEM)

La microscopia electrónica de transmisión (figura 4.32) es una importante técnica para estudiar defectos y precipitados (fases secundarias) en materiales. Gran parte de lo que se sabe ahora sobre defectos sería teoría especulativa y jamás se habría verificado sin la aplicación de la TEM, que resuelve características a escala de nanómetros.

Defectos como dislocaciones pueden observarse en la imagen de la pantalla de un TEM. A diferencia de las técnicas de la microscopia óptica y de SEM, donde la prepa-

ración de la muestra es más bien básica y fácil de lograr, la preparación de muestras para el análisis de TEM es más complicada y para ella hacen falta instrumentos muy especializados. Los especímenes que serán analizados con un TEM deben tener un espesor de varios cientos de nanómetros o menos, dependiendo del voltaje de operación del instrumento. Un espécimen preparado adecuadamente no es únicamente delgado sino que también tiene caras planas que son paralelas. Para lograr esto, se hace un corte delgado (de 3 a 0.5 mm) del material aplicando técnicas como maquinado de descarga eléctrica (empleada para muestras conductoras) y una sierra giratoria de alambre, entre otras. El espécimen se reduce entonces a un espesor de 50 μm, al tiempo que se mantienen las caras paralelas aplicando procesos de molienda o recubrimiento con máquina con abrasivos finos. Se aplican otras técnicas más avanzadas como el electropulido y el adelgazamiento con haces de iones para adelgazar una muestra hasta que alcance su espesor final.

En el TEM, se produce un haz de electrones mediante un filamento de tungsteno calentado que se encuentra en la parte superior de una columna evacuada y se acelera hacia la parte inferior de la columna con alto voltaje (por lo general, de 100 a 300 kV). Se usan serpentines electromagnéticos para condensar el haz de electrones, que luego se hace pasar a través del espécimen delgado colocado en la soporte para especímenes. A medida que los electrones pasan a través del espécimen, algunos se absorben y otros se dispersan de tal suerte que cambian de dirección. Queda ahora claro que el espesor de la muestra es crítico: una muestra gruesa no permitirá el paso de los electrones debido a la absorción y difracción excesivas. Las diferencias en los arreglos atómicos cristalinos causarán la dispersión electrónica. Después de que el haz de electrones se hace pasar a través del espécimen, se enfoca con el serpentín del objetivo (lente magnética) y luego se magnifica y proyecta sobre una pantalla fluorescente (figura 4.33). Puede formarse una imagen ya sea reuniendo a los electrones directos o a los electrones dispersos. La elección se hace insertando una abertura en el plano focal posterior del objetivo. La abertura se manipula de tal manera que pasen los electrones directos o los electrones dispersos. Si se selecciona el haz directo, la imagen resultante se denomina *imagen de campo brillante*, y si se seleccionan los electrones dispersos, se produce una *imagen de campo oscuro*.

En una modalidad de campo brillante, una región de un espécimen metálico que tienda a dispersar los electrones en mayor grado, aparecerá oscura en la pantalla de observación. Así, las dislocaciones que tienen un arreglo atómico lineal irregular aparecerán como líneas oscuras en la pantalla del microscopio electrónico. En la figura 4.34 se muestra una imagen de TEM de la estructura de dislocación de una lámina delgada de hierro deformada en 14% a -195°C.

4.5.4 Microscopia electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM)

Otra importante herramienta para el análisis de los defectos y la estructura cristalina es la microscopia electrónica de transmisión de alta resolución. El instrumento tiene una resolución de alrededor de 0.1 nm, lo que permite observar la estructura cristalina y los defectos a escala atómica. Para comprender lo que este grado de resolución puede revelar acerca de una estructura, considérese que la red constante de la celda unitaria de silicio a aproximadamente 0.543 nm es cinco veces mayor que la resolución ofrecida por el HRTEM. Los conceptos básicos que están detrás de estas técnicas son similares a los de la TEM. Sin embargo, la muestra debe ser considerablemente menor (del or-

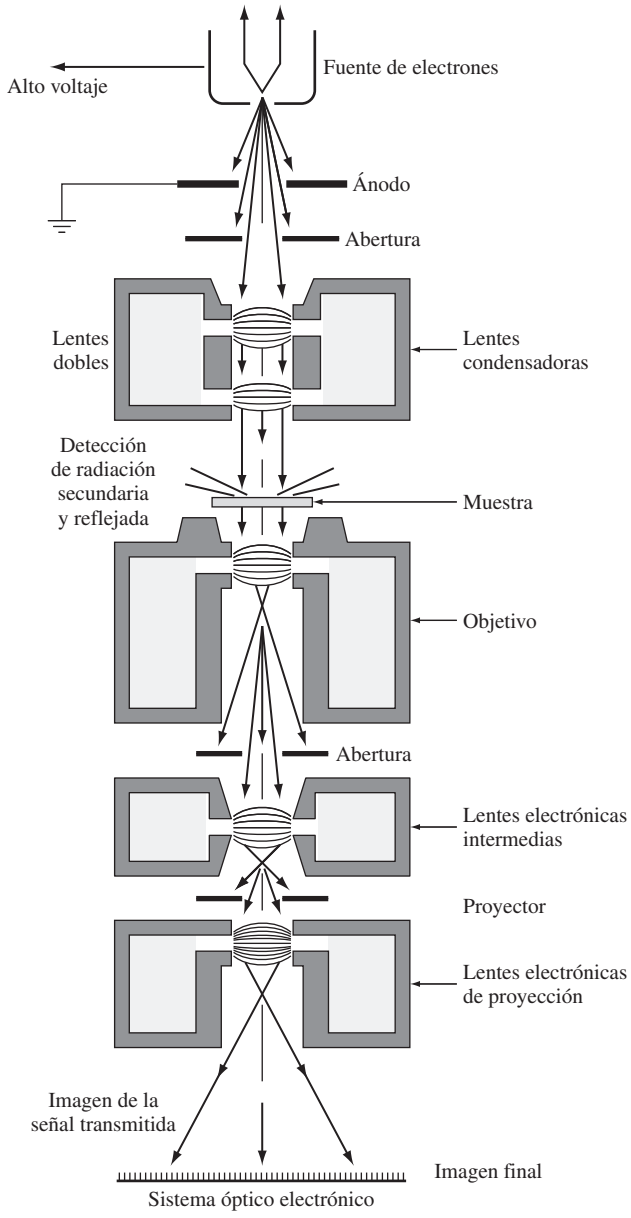


Figura 4.33
Esquema de la disposición del sistema de lentes en un microscopio electrónico de transmisión. Todas las lentes están colocadas en una columna a la que se le hace el vacío durante la operación. El recorrido del haz de electrones desde la fuente hasta el final de la imagen transmitida proyectada se indica por flechas. La muestra debe ser suficientemente delgada para que permita que el haz de electrones sea transmitido a través de ella y se coloca entre el condensador y el objetivo, tal como se muestra.
(Según L. E. Murr, "Electron and Ion Microscopy and Microanalysis", Marcel Decker, 1982, p. 105.)

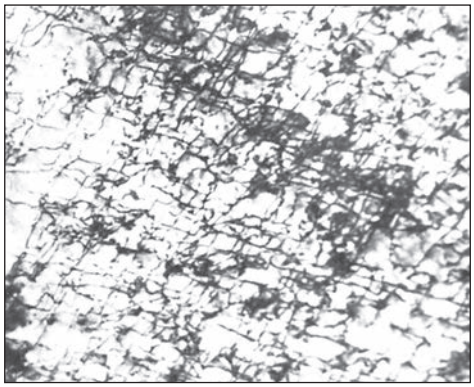


Figura 4.34
Estructura de dislocaciones en hierro deformado de 14% a –195°C. Las dislocaciones se muestran como líneas oscuras porque los electrones se han dispersado a lo largo de las disposiciones atómicas lineales irregulares de las dislocaciones. (Lámina fina; ampliación: 40 000×.)
(Según "Metals Handbook", vol. 8, 8a. ed., American Society for Metals, 1973, p. 219.)

den de 10 a 15 nm). En determinadas situaciones, es posible observar una proyección bidimensional de un cristal con los efectos que lo acompañan. Para lograr esto, la muestra delgada se inclina de tal manera que un índice de dirección bajo en el plano sea perpendicular a la dirección del haz de electrones (los átomos están exactamente unos encima de otros en relación con el haz). El patrón de difracción representa el potencial periódico de los electrones en dos dimensiones. La interferencia de todos los haces difractados y del haz principal, al unirse de nuevo usando el objetivo, proporciona una imagen amplificada del potencial periódico. La figura 4.35 muestra la imagen de HRTEM de varias dislocaciones de orilla que forman un borde de ángulo agudo. En la figura, la parte superior está inclinada en relación con la mitad inferior. Debe mencionarse que debido a las limitaciones en el objetivo del HRTEM, no se logra fácilmente un análisis cuantitativo exacto de las imágenes, el cual debe hacerse con cuidado.

4.5.5 Microscopios de sonda de barrido y resolución atómica

El *microscopio de túnel de barrido* (STM) y el *microscopio de fuerza atómica* (AFM) son dos de los muchos instrumentos inventados recientemente que permiten a los científicos analizar y crear imágenes de los materiales a escala atómica. Estos instrumentos y otros con capacidades similares se clasifican como técnicas de *microscopia de sonda de barrido* (SPM). Los sistemas de SPM tienen la capacidad de ampliar las características de la superficie a escala subnanométrica, y producen un mapa topográfico de la superficie a escala atómica. Estos instrumentos tienen importantes aplicaciones en muchos sectores científicos, incluso en las ciencias de la superficie —sin limitarse a ellas— donde el ordenamiento de los átomos y sus enlaces son importantes; en la metrología donde debe analizarse la aspereza de la superficie de los materiales, y la nanotecnología donde la posición de los átomos o moléculas puede manipularse y pueden investigarse nuevos fenómenos a escala nanométrica. Es pertinente exponer estos sistemas, cómo funcionan, la naturaleza de la información que brindan, así como sus aplicaciones.

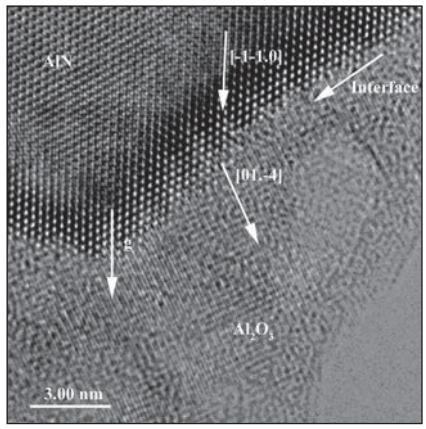


Figura 4.35
Imagen HRTEM de un límite de ángulo pequeño.
(Trabajo realizado en el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, Berkeley, California. J. Chaudhuri, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Texas, Lubbock, Texas y J. Perrin, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Estatal de Wichita, Wichita, Kansas.)

Microscopio de túnel de barrido Los investigadores de IBM, G. Binning y H. Rohrer, inventaron la técnica STM a principios de la década de 1980. En 1986 recibieron el Premio Nobel de Física por este invento. En esta técnica, suele fabricarse una punta muy afilada (figura 4.36) con metales como tungsteno, níquel, platino-iridio u oro, y recientemente con nanotubos de carbono (véase la sección 11.11); se usa para sondear la superficie de una muestra.

La punta se coloca primero a una distancia del orden del diámetro de un átomo (de $\cong 0.1$ a 0.2 nm) desde la superficie de la muestra. A una distancia tan pequeña, las nubes de electrones de los átomos que se encuentran en la punta de la sonda interactúan con las nubes de electrones de los átomos de la superficie de la muestra. Si en este punto se aplica un pequeño voltaje a través de la punta y la superficie, los electrones harán que la brecha se transforme en un "túnel" y, por lo tanto, producirán una pequeña corriente que puede detectarse y registrarse. En general, la muestra se analiza bajo vacío ultra alto para evitar la contaminación y oxidación de la superficie.

La corriente producida es en extremo sensible al tamaño de la brecha entre la punta y la superficie. Cambios pequeños en el tamaño de la brecha producen un aumento exponencial en la corriente detectada. Como resultado de ello, pueden detectarse cambios pequeños (de menos de 0.1 nm) en la posición de la punta, en relación con la superficie. La magnitud de la corriente se mide cuando la punta se coloca directamente sobre un átomo (su nube de electrones). Esta corriente se mantiene al mismo nivel a medida que la punta avanza sobre los átomos y los valles entre los átomos (*modalidad de corriente constante*) (figura 4.37*a*). Esto se logra mediante el ajuste de la posición vertical de la punta. Son necesarios pequeños movimientos para ajustar y mantener la co-

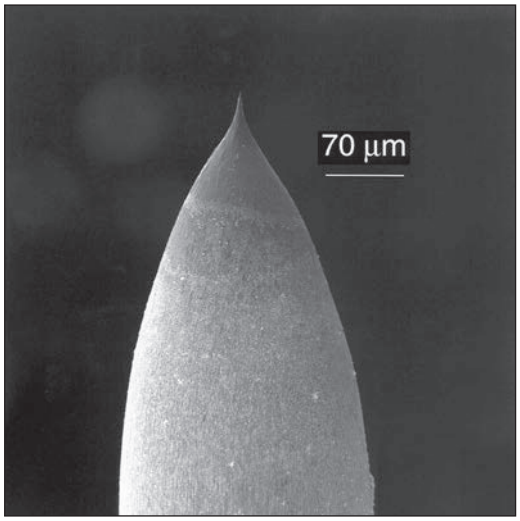
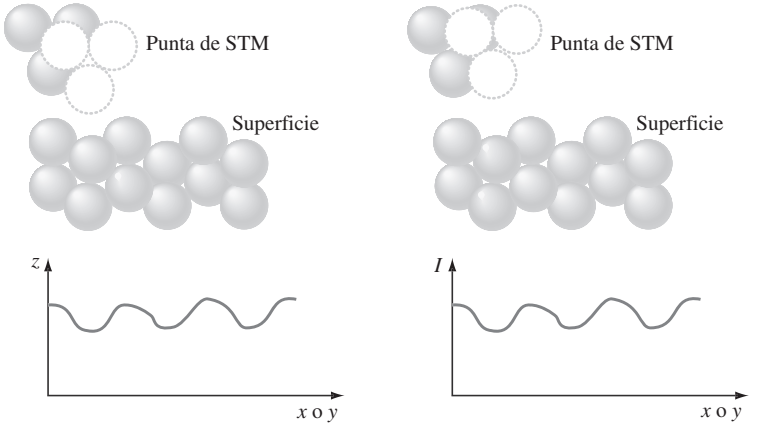


Figura 4.36
Punta de STM fabricada con aleación de Pt-Ir. La punta se afila usando técnicas de ataque químico.
(*Cortesía de Molecular Corp.*)



a) Modalidad de corriente constante *b*) Modalidad de altura constante

Figura 4.37
Esquema que muestra las modalidades de operación de STM. *a*) Ajustar la coordenada *z* de la punta para mantener la corriente constante (registrar los ajustes *z*), *b*) Ajustar la corriente en la punta para mantener la altura constante (registrar los ajustes *I*).

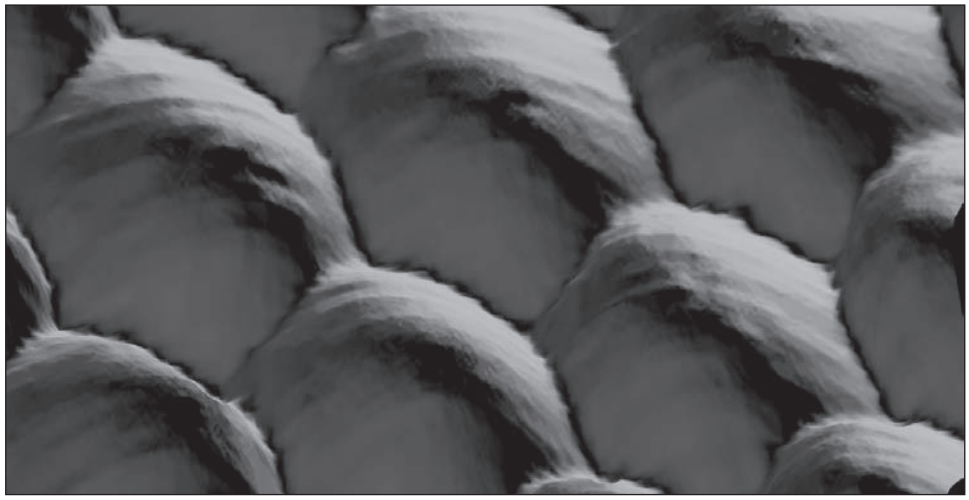


Figura 4.38
Imagen TEM de campo brillante de alta resolución de la región de interface AlN/Al_2O_3 de un monocristal AlN oxidado.
(IBM Research, Almaden Research Center.)

rriente a través de la punta la cual se usa entonces para trazar un mapa de la superficie. También se puede trazar un mapa de la superficie por medio de una *modalidad de altura constante* en la que la distancia relativa entre la punta y la superficie se mantiene a un valor constante y se registran los cambios de corriente (figura 4.37*b*). La calidad de la topografía de la superficie que logra el STM es impresionante cuando se observan imágenes de STM de la superficie del platino y el silicio (figura 4.38).

Algo de suma importancia en este punto es que el diámetro de la punta debe ser del orden de un solo átomo para mantener la resolución a escala atómica. Las puntas de metal convencionales pueden desgastarse y dañarse fácilmente durante el proceso de barrido, lo que da como resultado una imagen de mala calidad. Recientemente se están empleando como nanopuntas para aplicaciones de STM y AFM, nanotubos de carbono de aproximadamente uno a décimos de nanómetro de diámetro, dada su estructura delgada y su fuerza. El STM se utiliza principalmente con fines de topografía y no ofrece información cuantitativa sobre la naturaleza de los enlaces y las propiedades del material. Debido a que la función del aparato se basa en crear y vigilar pequeñas cantidades de corriente, solamente puede trazarse un mapa de materiales conductores de electricidad, incluyendo a los metales y semiconductores. Sin embargo, muchos materiales de gran interés para la comunidad dedicada a la investigación, como materiales biológicos o polímeros, no son conductores, por consiguiente, no pueden analizarse por medio de esta técnica. Para los materiales no conductores se aplican las técnicas de AFM.

Microscopio de fuerza atómica El AFM aplica un principio similar al del STM ya que emplea una punta para sondear la superficie. Sin embargo, en este caso, la punta está conectada a un filamento volado. A medida que la punta interactúa con la superficie de la muestra, las fuerzas (fuerzas de Van der Waals) que actúan sobre la punta, flexionan el filamento. La interacción puede ser una fuerza de repulsión de

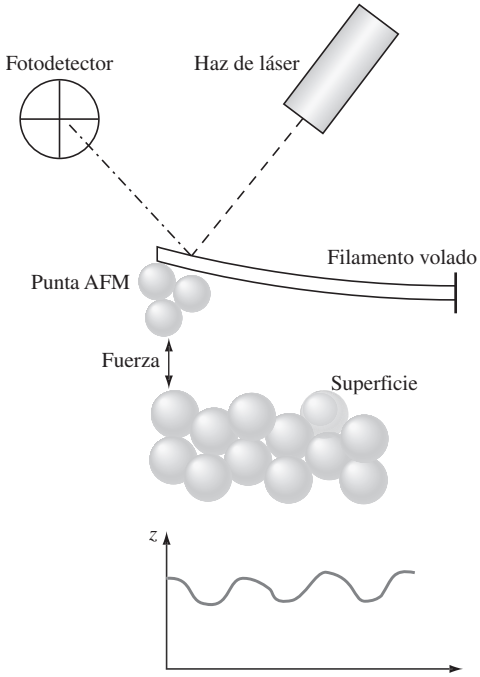


Figura 4.39
Esquema que muestra la técnica básica de AFM.

corto alcance (*AFM de modalidad de contacto*) o una fuerza de atracción de largo alcance (*modalidad AFM sin contacto*). La desviación del haz se registra con un láser y un fotodetector dispuestos como se muestra en la figura 4.39. La desviación se emplea para calcular la fuerza que actúa sobre la punta. Durante el barrido, la fuerza se mantendrá a un nivel constante (similar a la modalidad de corriente constante en el STM) y se registrará el desplazamiento de la punta. La topografía de la superficie se determina a partir de estos pequeños desplazamientos. A diferencia del STM, el principio del AFM no se basa en un túnel de corriente a través de la punta, y puede, por lo tanto, aplicarse a todos los materiales, incluso aquellos no conductores. Ésta es la principal ventaja del AFM sobre su predecesor, el STM. Existen hoy día muchas otras técnicas basadas en AFM disponibles con diversas modalidades de formación de imágenes, incluso magnéticas y acústicas. Se está empleando el AFM en distintas modalidades de formación de imágenes en sectores como la investigación acerca del DNA, seguimiento *in situ* la corrosión en los materiales, templado *in situ* de los polímeros y tecnología de revestimiento con polímeros. La comprensión básica de cuestiones importantes en los sectores antes mencionados ha mejorado considerablemente gracias a la aplicación de estas técnicas.

Entender el comportamiento de los materiales avanzados a escala atómica impulsa a la microscopia electrónica de alta resolución de vanguardia, que a su vez brinda una oportunidad para la invención de nuevos materiales. Las técnicas de microscopia electrónica y de sonda de barrido son y serán de especial importancia para la nanotecnología y los materiales nanoestructurados.

4.6 RESUMEN

La mayoría de metales y aleaciones se funden y se moldean en forma semiacabada o acabada. Durante la solidificación del metal en el molde se forman núcleos que se convierten en granos, dando lugar a un metal de fundición solidificado con una estructura de grano policristalina. Para la mayoría de las aplicaciones industriales es preferible que el grano sea de tamaño muy pequeño. El tamaño del grano puede determinarse de manera indirecta mediante el número de tamaño de grano *n* de la ASTM o se puede determinar directamente midiendo el diámetro promedio del grano. Los monocristales de gran tamaño rara vez se fabrican en la industria; sin embargo, una excepción son los grandes monocristales de silicio producidos para la industria de semiconductores. Para este material se necesitan condiciones de solidificación especiales y silicio de elevada pureza.

Los defectos cristalinos se presentan en todos los materiales cristalinos reales, incluso a nivel de tamaño iónico y atómico. Las vacantes o posiciones atómicas vacías en metales pueden explicarse en términos de la agitación térmica de los átomos y se consideran defectos de red de equilibrio. Las dislocaciones (defectos de línea) tienen lugares en metales cristalinos y se originan en gran número en los procesos de solidificación. Las dislocaciones no son defectos de equilibrio y aumentan la energía interna del metal. Las dislocaciones pueden observarse en las imágenes del microscopio electrónico de transmisión. Los límites de grano son defectos de la superficie en metales originados por diferentes orientaciones de cristales contiguos durante la solidificación. Otros importantes tipos de defectos que afectan a las propiedades de los materiales, son las maclas, las fronteras de ángulo pequeño, las fronteras de ángulo grande, las fallas de apilamiento y los precipitados.

Los especialistas en ciencia e ingeniería de los materiales emplean instrumentos de alta tecnología para conocer la estructura interna (incluso estructuras defectuosas), el comportamiento y las fallas de los materiales. Instrumentos como metalógrafos, SEM, TEM (HRTEM) y SPM permiten el análisis de los materiales en el intervalo macro a nano. Sin tales instrumentos la comprensión de la conducta de los materiales sería imposible.

4.7 DEFINICIONES

Sección 4.1

Núcleos: pequeñas partículas de la fase recién formada en un cambio de fase (por ejemplo, solidificación) que pueden crecer hasta que se completa el cambio.

Nucleación homogénea (referida a la solidificación de metales): la formación de regiones muy pequeñas de una nueva fase sólida (llamada *núcleos*) en un metal puro, que pueden desarrollarse hasta que la solidificación sea completa. El metal puro homogéneo proporciona por sí mismo los átomos que conforman el núcleo.

Embriones: pequeñas partículas de la fase recién formada en un cambio de fase (por ejemplo, solidificación) que no presentan el tamaño crítico y que pueden redisolverse.

Radio crítico *r del núcleo:** el radio mínimo que una partícula de una fase recién formada por nucleación debe tener para llegar a ser un núcleo estable.

Nucleación heterogénea (referida a la solidificación de metales): la formación de regiones muy pequeñas (llamadas *núcleos*) de una nueva fase sólida en las interfases de impurezas sólidas. Estas impurezas, a una temperatura particular, disminuyen el tamaño crítico de los núcleos sólidos estables.

Grano: cristal único (monocristal) en un agregado policristalino.

Granos equiaxiales: granos que son aproximadamente iguales en todas las direcciones y que tienen orientaciones cristalográficas al azar.

Granos columnares: granos largos y delgados en una estructura cristalina solidificada. Estos granos se forman en el interior del lingote de metal solidificando cuando el calor fluye uniaxialmente durante la solidificación.

Sección 4.2

Estructura policristalina: estructura cristalina que contiene muchos granos.

Sección 4.3

Aleación: mezcla de dos o más metales o un metal (metales) y un no metal (no metales).

Solución sólida: aleación de dos o más metales o un metal(es) y un no metal(es) que se encuentran en una mezcla atómica de fase única.

Solución sólida sustitucional: solución sólida en que los átomos de soluto de un elemento pueden sustituir a los átomos de disolvente de otro elemento. Por ejemplo, en la solución sólida Cu-Ni, los átomos de cobre pueden sustituir a los átomos de níquel en la red cristalina de la solución sólida.

Solución sólida intersticial: solución sólida formada por átomos de soluto que pueden entrar en los intersticios o agujeros de la red atómica del disolvente.

Sección 4.4

Vacante: defecto puntual en una red cristalina donde un átomo ha desaparecido de una posición atómica.

Intersticialidad (autointersticial): defecto puntual de la red cristalina donde un átomo de la misma especie que los de la matriz se coloca en una posición intersticial de la red.

Defecto de Frenkel: un defecto puntual en un cristal iónico en el que una vacante catiónica va asociada a un catión intersticial.

Defecto de Schottky: defecto puntual en un cristal iónico en el que una vacante catiónica está asociada a una vacante aniónica.

Dislocación: un defecto cristalino en el que una distorsión de la red se encuentra centrada alrededor de una línea. La distancia de desplazamiento de los átomos alrededor de la dislocación se llama *vector de deslizamiento* o *vector* **b** *de Burgers*. Para una *dislocación de arista*, el vector de deslizamiento es perpendicular a la línea de dislocación, mientras que para una dislocación helicoidal el vector de deslizamiento es paralelo a la línea de dislocación. Una *dislocación mixta* tiene ambos componentes de arista y helicoidales.

Límite de grano: defecto planar que separa cristales (granos) de diferentes orientaciones en un agregado policristalino.

Índice de tamaño de grano: número nominal (promedio) de granos por unidad de superficie para una ampliación particular.

Bordes gemelos (maclas): una imagen en el espejo desorientada de la estructura del cristal, la cual es considerada como un defecto de la superficie.

Fronteras de ángulo pequeño (inclinado): un arreglo de dislocación de formación angular desalineado dentro de un cristal.

Fronteras de la macla: un arreglo de dislocación helicoidal que crea que los átomos se desordenen dentro de un cristal.

Fallas de apilamiento: una superficie defectuosa que se forma debido al apilamiento impropio (fuera de lugar) de los planos atómicos.

Sección 4.5

Microscopio electrónico de barrido (SEM): instrumento empleado para examinar la superficie de un material con una ampliación muy grande mediante electrones incidentes.

Microscopio electrónico de transmisión (TEM): instrumento empleado para estudiar estructuras defectuosas internas mediante el paso de electrones a través de películas delgadas de materiales.

Microscopio electrónico de transmisión de alta resolución (HRTEM): técnica que se basa en la TEM pero con una resolución considerablemente mayor mediante el uso de muestras considerablemente más delgadas.

Microscopia de sonda de barrido (SPM): técnicas de microscopia como STM y AFM que permiten el trazado de mapas de la superficie de un material a escala atómica.

4.8 PROBLEMAS

Las respuestas a los problemas marcados con un asterisco se encuentran al final del libro.

4.1 Describa y dibuje el proceso de solidificación de un metal puro en términos de nucleación y crecimiento de cristales.

4.2 Defina el proceso de nucleación homogénea para la solidificación de un metal puro.

4.3 En la solidificación de un metal puro, ¿cuáles son las dos energías involucradas en la transformación? Escriba la ecuación para el cambio total de energía libre involucrada en la transformación del líquido para producir un núcleo sólido libre de deformaciones mediante la nucleación homogénea. Ilustre gráficamente los cambios de energía asociados con la formación del núcleo durante la solidificación.

4.4 En la solidificación de un metal, ¿cuál es la diferencia entre un embrión y un núcleo? ¿Qué es el radio crítico de una partícula que solidifica?

4.5 Durante la solidificación, ¿cómo afecta el grado de su enfriamiento al tamaño crítico del núcleo? Supóngase nucleación homogénea.

4.6 Distinga entre nucleación homogénea y heterogénea para la solidificación de un metal puro.

***4.7** Calcule el tamaño (radio) del núcleo de tamaño crítico del platino puro cuando tiene lugar una nucleación homogénea.

4.8 Calcule el número de átomos en un núcleo de tamaño crítico para la nucleación homogénea del platino puro.

4.9 Calcule el radio de los núcleos de tamaño crítico de hierro puro cuando tiene lugar una nucleación homogénea.

***4.10** Calcule el número de átomos en un núcleo de tamaño crítico para la nucleación homogénea de hierro puro.

4.11 Describa la estructura del grano de un lingote de metal producido por enfriamiento lento del metal en molde abierto estacionario.

4.12 Distinga entre granos equiaxiales y columnares en una estructura de metal solidificado.

4.13 ¿Cómo podría usted obtener un lingote de fundición con una estructura de grano fino? ¿Cómo se consigue afinar el grano en la industria de función de lingotes de aleaciones de aluminio?

4.14 ¿Qué técnicas especiales deben utilizarse para obtener monocristales?

4.15 ¿Cómo se producen los monocristales de silicio de gran tamaño para la industria de semiconductores?

4.16 ¿Qué es una aleación metálica? ¿Qué es una solución sólida?

4.17 Distinga entre una solución sólida sustitucional y una solución sólida intersticial.

4.18 ¿Cuáles son las condiciones más favorables para una solubilidad completa de un elemento en otro?

4.19 Utilizando los datos de la tabla adjunta, prediga el grado relativo de solubilidad sólida de los siguientes elementos en aluminio:

*a) cobre
b) manganeso
*c) magnesio
d) zinc
*e) silicio

Utilice la escala de muy alto, 70-100%; alto, 30-70%; moderado, 10-30%; bajo, 1-10%; y muy bajo, <1 por ciento.

Elemento	Radio atómico (nm)	Estructura cristalina	Electro-negatividad	Valencia
Aluminio	0.143	FCC	1.5	+3
Cobre	0.128	FCC	1.8	+2
Manganeso	0.112	Cúbica	1.6	+2, +3, +6, +7
Magnesio	0.160	HCP	1.3	+2
Zinc	0.133	HCP	1.7	+2
Silicio	0.117	Cúbica de diamante	1.8	+4

4.20 Utilizando los datos de la tabla siguiente, prediga el grado relativo de solubilidad sólida de los siguientes elementos en hierro:

a) níquel
b) cromo
c) molibdeno
d) titanio
e) manganeso

Utilice la escala de muy alto, 70-100%; alto, 30-70%; moderado, 10-30%; bajo, 1-10%; y muy bajo, <1 por ciento.

Elemento	Radio atómico (nm)	Estructura cristalina	Electro-negatividad	Valencia
Hierro	0.124	BCC	1.7	+2, +3
Níquel	0.125	FCC	1.8	+2
Cromo	0.125	BCC	1.6	+2, +3, +6
Molibdeno	0.136	BCC	1.3	+3, +4, +6
Titanio	0.147	HCP	1.3	+2, +3, +4
Manganeso	0.112	Cúbica	1.6	+2, +3, +6, +7

***4.21** Calcule el radio del mayor hueco intersticial de la red del hierro α BCC. El radio atómico del átomo de hierro en esta red es de 0.124 nm, y los mayores huecos intersticiales se dan en las posiciones tipo $(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 0)$; $(\frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 0)$; $(\frac{3}{4}, \frac{1}{2}, 0)$; y $(\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, 0)$, etcétera.

4.22 Describa y dibuje los diferentes tipos de defectos puntuales que pueden presentarse en una red metálica: *a*) vacante, *b*) divacante y *c*) intersticial.

4.23 Describa y dibuje los siguientes tipos de defectos que pueden presentarse en redes cristalinas: *a*) defecto de Frenkel y *b*) defecto de Schottky.

4.24 Describa y dibuje las dislocaciones de arista y helicoidales. ¿Qué tipo de campo de deformaciones rodean a ambos tipos de dislocaciones?

4.25 Describa la estructura de un límite de grano. ¿Por qué los límites de grano son lugares favorables para la nucleación y crecimiento de precipitados?

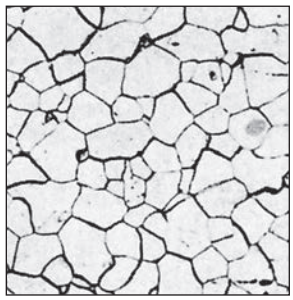
4.26 ¿Por qué los límites de grano se observan fácilmente en el microscopio óptico?

4.27 ¿Cómo se mide el tamaño de grano de un material policristalino por el método ASTM?

***4.28** Si se tienen 600 granos por pulgada cuadrada en una micrografía de un metal a 100× aumentos, ¿cuál es el número ASTM de tamaño de grano?

4.29 Si se tienen 400 granos por pulgada cuadrada en la micrografía de un material cerámico a 200× aumentos, ¿cuál es el número ASTM de tamaño de grano del material?

4.30 Determine, por conteo, el número ASTM de tamaño de grano de la lámina de acero bajo en carbono mostrada en la figura P4.30. Esta micrografía está a 100×.



100X

Figura P4.30
(Según "Metals Handbook", vol. 7, 8a. ed., American Society for Metals, 1972, p. 4.)

Tutorial

***4.31** Determine el número ASTM de tamaño de grano del acero inoxidable tipo 430 en la micrografía mostrada en la figura P4.31. Esta micrografía está a 200×.

200X

Figura P4.31
(Según "Metals Handbook", vol. 7, 8a. ed., American Society for Metals, 1972, p. 4.)

4.9 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. Remítase a la figura 4.11*b* en la que un álabe de turbina se fabrica en grandes granos columnares; proponga un proceso que se aplique para conseguir una solidificación direccional.
2. Diseñe un proceso para producir en continuo hilos de cobre de elevada pureza.
3. Una barra de acero de sección circular de bajo contenido en carbono se moldea para que su estructura granular sea equiaxial. Su aplicación precisa que la dimensión del grano sea más larga en la dirección del eje longitudinal de acero de la barra. ¿Cómo conseguiría esto?

4. Debe seleccionar un material con granos grandes entre el cobre con un tamaño de grano ASTM de 7 y un acero suave con un tamaño de grano 4 para una aplicación determinada. ¿Qué material seleccionaría y por qué?

5. En el proceso de soldadura, dos componentes se unen rellenando el espacio entre los dos con metal fundido. *a*) Exponga cómo funciona este proceso desde el punto de vista de la solidificación. *b*) ¿Cuáles son algunos de los factores cruciales para obtener una unión soldada resistente?

6. ¿Cuál es la importancia o cuáles son las repercusiones de los defectos de Schottky y Frenkel en el comportamiento de los materiales iónicos?

7. En determinadas aplicaciones, a temperatura ambiente, debe seleccionarse una aleación de cobre, pero hay dos posibilidades: una aleación de un tamaño de grano ASTM de 4 y una aleación de tamaño de grano de 8. Si la resistencia a la tensión es importante, ¿cuál de las dos elegiría?

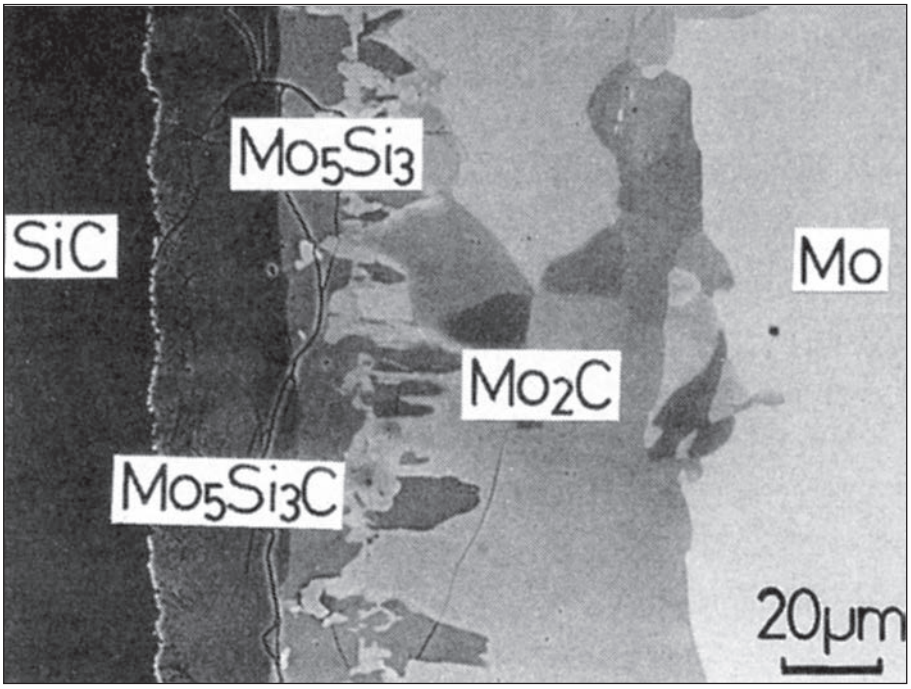
8. Responda a la pregunta 7 suponiendo que la aplicación es a temperatura elevada (por debajo de la temperatura de fusión).

9. ¿Qué diferencia de comportamiento podemos esperar entre un componente metálico monocristalino y uno policristalino?

10. La plata pura es blanda, costosa, inestable químicamente y no duradera. Seleccione un elemento de aleación y el correspondiente porcentaje en peso para mejorar las propiedades de la plata sin comprometer su estructura y atractivo como metal precioso.

CAPÍTULO 5

Procesos activados por temperatura y difusión en los sólidos



(Según "Engineered Materials Handbook, vol. 4: Ceramics and Glasses", American Society for Metals, p. 525. ISBN 0-87170-282-7. ASM International.)

Los componentes de un motor de automóvil suelen fabricarse con una combinación de metales y materiales cerámicos. Los metales son de alta resistencia y ductilidad y los materiales cerámicos ofrecen alta resistencia a la temperatura, estabilidad química y poco desgaste. En muchas situaciones, es necesario unir una pieza metálica a una capa delgada de material cerámico para fabricar la mejor pieza para la aplicación. La capa cerámica servirá para proteger la pieza metálica interior de ambientes corrosivos a alta temperatura. Un método para unir componentes metálicos y cerámicos es por medio del enlace de estado sólido. El proceso funciona con la aplicación simultánea de presión y alta temperatura. La presión aplicada desde el exterior asegura el contacto entre las superficies de unión, y la alta temperatura facilita la difusión a través de la superficie de contacto. La figura muestra la microestructura interfacial cuando el metal molibdeno (Mo) se une con una capa delgada de carburo de silicio (SiC) a una temperatura de enlace de 1 700°C y una presión de 100 MPa durante un periodo de una hora. Obsérvese que existe una zona de transición que contiene principalmente una capa de Mo_2C (carburo) y Mo_5Si_3 (silisiuro). Estos productos se forman debido a la difusión y forman un enlace fuerte. ■

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Describir la cinética en los procesos sólidos que implican movimientos de átomos en un estado sólido con base en una relación de Boltzmann. Explicar el concepto de energía de activación, E*, y determinar la fracción de átomos o moléculas que tienen una energía mayor a E* a una temperatura determinada.
2. Describir el efecto de la temperatura en las velocidades de reacción con base en la ecuación de velocidad de Arrhenius.
3. Describir los dos mecanismos principales de la difusión.
4. Distinguir entre difusión en estado estacionario y en estado no estacionario y aplicar la primera y segunda leyes de Fick para la solución de problemas relacionados con la difusión.
5. Describir las aplicaciones industriales del proceso de difusión.

5.1 CINÉTICA EN LOS PROCESOS SÓLIDOS

Muchos de los procesos involucrados en la producción y utilización de los materiales de ingeniería tienen relación con la velocidad a que los átomos se mueven en estado sólido. En muchos de estos procesos tienen lugar reacciones en estado sólido que implican reacomodos espontáneos de los átomos a posiciones atómicas nuevas y más estables. Para que estas reacciones tengan lugar desde el estado inicial hasta el estado final, los átomos reaccionantes deben tener suficiente energía para superar una barrera de energía de activación. La energía adicional requerida por encima de la energía media de los átomos se llama **energía de activación** ΔE^*, y se mide generalmente en julios o en calorías por mol. En la figura 5.1 se ilustra la energía de activación para una reacción en estado sólido térmicamente activada. Los átomos que poseen un nivel de energía E_r (energía de los reactivos) $+ \Delta E^*$ (energía de activación) tendrán suficiente energía para reaccionar espontáneamente y alcanzar el estado reaccionado E_p (energía de los productos). La reacción que se muestra en la figura 5.1 es exotérmica, lo cual indica que la energía se desprende de la reacción.

A una temperatura determinada sólo una fracción de moléculas o átomos del sistema tendrá suficiente energía para alcanzar el nivel de energía de activación E^*. A medida que aumenta la temperatura del sistema, un número creciente de moléculas o átomos podrá alcanzar el nivel de la energía de activación. Boltzman estudió el efecto de la temperatura en el incremento de la energía de las moléculas de un gas. Basados en el análisis estadístico, los resultados de Boltzman muestran que la probabilidad de encontrar una molécula o un átomo en un nivel de energía E^* mayor que la energía media E de todas las moléculas o átomos en un sistema a una determinada temperatura T en kelvins, era:

$$\text{Probabilidad} \propto e^{-(E^* - E)/kT} \qquad \textbf{(5.1)}$$

donde k = constante de Boltzman $= 1.38 \times 10^{-23}$ J/(átomo · K).

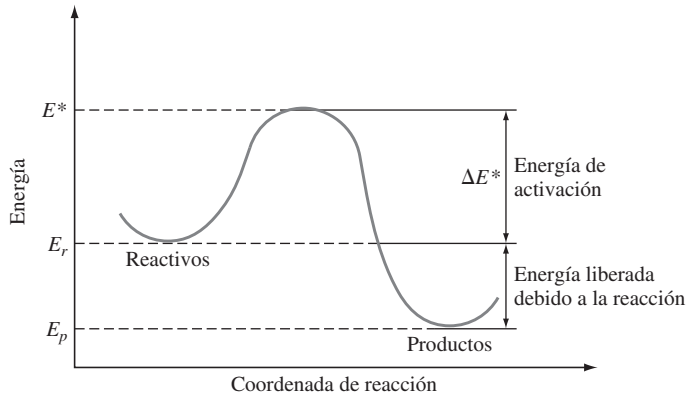


Figura 5.1
Energía de especies en reacción a medida que avanza del estado sin reaccionar al estado de reacción.

La fracción de los átomos o moléculas en un sistema que tiene energía superior a E^*, donde E^* es mucho mayor que la energía media de cualquier átomo o molécula, puede escribirse como:

$$\frac{n}{N_{\text{total}}} = Ce^{-E^*/kT} \tag{5.2}$$

donde n = número de átomos o moléculas con una energía superior a E^*
N_{total} = número total de átomos o moléculas presentes en el sistema
k = constante de Boltzman = 8.62×10^{-5} eV/K
T = temperatura, K
C = una constante

El número de vacantes en equilibrio a una determinada temperatura en una red cristalina metálica puede expresarse por la siguiente relación, que es similar a la ecuación 5.2:

$$\frac{n_v}{N} = Ce^{-E_v/kT} \tag{5.3}$$

donde n_v = número de vacantes por metro cúbico del metal
N = número total de posiciones atómicas por metro cúbico del metal
E_v = energía de activación para formar una vacante (eV)
T = temperatura absoluta (K)
k = constante de Boltzman = 8.62×10^{-5} eV/K
C = constante

En el problema de ejemplo 5.1 la concentración de vacantes en equilibrio presentes en el cobre puro a 500°C se calcula utilizando la ecuación 5.3 y asumiendo que $C = 1$. De acuerdo con estos cálculos, ¡sólo hay, aproximadamente, una vacante por cada millón de átomos!

PROBLEMA DE EJEMPLO 5.1

Calcule *a*) el número de vacantes de equilibrio por metro cúbico en el cobre puro a 500°C y *b*) la fracción de vacantes a 500°C del cobre puro. Aplique la ecuación 5.3 con $C = 1$. (La constante de Boltzmann $k = 8.62 \times 10^{-5}$ eV/K.)

■ Solución

a) El número de vacantes de equilibrio por metro cúbico en cobre puro a 500°C es

$$n_v = Ne^{-E_v/kT} \text{ (asumiendo } C = 1) \qquad \textbf{(5.3}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

donde n_v = número de vacantes/m^3
N = número total de posiciones atómicas/m^3
E_v = energía de activación para formar una vacante en cobre puro a 500°C (eV)
k = constante de Boltzmann
T = temperatura (K)

Primero se determina un valor para N utilizando la ecuación

$$N = \frac{N_0 \rho_{Cu}}{\text{Masa atómica Cu}} \qquad \textbf{(5.4)}$$

donde N_0 = constante de Avogadro y ρ_{Cu} = densidad de Cu = 8.96 Mg/m^3. Así,

$$N = \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ átomos}}{\text{Masa atómica}} \times \frac{1}{63.54 \text{ g/masa atómica}} \times \frac{8.96 \times 10^{6} \text{ g}}{\text{m}^3}$$

$$= 8.49 \times 10^{28} \text{ átomos/m}^3$$

Sustituyendo los valores de N, E_v, k y T en la ecuación 5.3*a* se obtiene

$$n_v = Ne^{-E_v/kT}$$

$$= (8.49 \times 10^{28}) \left\{ \exp\left[-\frac{0.90 \text{ eV}}{(8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K})(773 \text{ K})} \right] \right\}$$

$$= (8.49 \times 10^{28})(e^{-13.5}) = (8.49 \times 10^{28})(1.37 \times 10^{-6})$$

$$= 1.2 \times 10^{23} \text{ vacantes/m}^3 \blacktriangleleft$$

b) La fracción de vacantes en el cobre puro a 500°C se calcula a partir de la relación n_v/N en la ecuación 5.3*a*:

$$\frac{n_v}{N} = \exp\left[-\frac{0.90 \text{ eV}}{(8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K})(773 \text{ K})} \right]$$

$$= e^{-13.5} = 1.4 \times 10^{-6} \blacktriangleleft$$

¡Así, hay sólo una vacante para cada 10^6 posiciones atómicas!

Arrhenius[1] encontró experimentalmente una expresión similar a la relación de Boltzmann para la energía de las moléculas en un gas que describe el efecto de la temperatura en las velocidades de las reacciones químicas. Arrhenius encontró que la ve-

[1] Svante August Arrhenius (1859-1927). Físico-químico sueco, fue uno de los fundadores de la química física moderna y estudió experimentalmente la velocidad de las reacciones.

locidad de muchas reacciones químicas se podría expresar como una función de la temperatura por la relación:

Ecuación de la velocidad de Arrhenius: Velocidad de reacción $= Ce^{-Q/RT}$ **(5.5)**

donde Q = energía de activación, J/mol o cal/mol
R = constante molar de los gases
= 8.314 J/(mol · K) o 1.987 cal/(mol · K)
T = temperatura (K)
C = constante de velocidad, independiente de la temperatura

Trabajando con líquidos y sólidos la energía de activación se expresa normalmente en términos de un mol, o 6.02×10^{23} átomos o moléculas. La energía de activación suele representarse por el símbolo Q y se expresa en julios por mol o en calorías por mol.

En las ecuaciones de Boltzmann (5.2) y de Arrhenius (5.5) se asume que la velocidad de reacción entre átomos o moléculas en muchos casos depende del número de átomos o moléculas reactivas que tengan una energía igual o superior a la energía de activación E^*. Las velocidades de muchas reacciones en estado sólido, de particular interés para los científicos e ingenieros metalúrgicos, obedecen la ley de velocidad de Arrhenius, que se utiliza incluso para analizar los datos experimentales de velocidad en el estado sólido.

La ecuación de Arrhenius (5.5) generalmente se transcribe en términos de logaritmos naturales como:

$$\text{En velocidad} = \ln C - \frac{Q}{RT} \tag{5.6}$$

Esta ecuación es la suma recta del tipo

$$y = b + mx \tag{5.7}$$

donde b es la ordenada en el origen y m la pendiente de la recta. El término ln (velocidad) de la ecuación 5.6, es equivalente al término y de la ecuación 5.7, y el término ln (constante) de la ecuación 5.6 es equivalente al término b de la ecuación 5.7. La cantidad $-Q/R$ de la ecuación 5.6 es equivalente a la pendiente m de la ecuación 5.7. Así, representando el ln (velocidad) *versus* $1/T$ se obtiene una línea recta de pendiente $-Q/R$.

La ecuación de Arrhenius (5.5) puede también transcribirse en términos de logaritmos decimales, como:

$$\log_{10} \text{velocidad} = \log_{10} C - \frac{Q}{2.303\,RT} \tag{5.8}$$

El factor de conversión de logaritmos natural a decimal es 2.303. Esta ecuación es también la ecuación de una línea recta. En la figura 5.2 se muestra una representación esquemática de $\log_{10}$ velocidad *versus* $1/T$.

Así, si una gráfica experimental de ln (velocidad de reacción) *versus* $1/T$ es una línea recta, la energía de activación para el proceso se puede calcular a partir de la pendiente de la recta. Se puede utilizar la ecuación de Arrhenius para estudiar el efecto de la temperatura en la difusión de los átomos y la conductividad eléctrica de los semiconductores elementales puros.

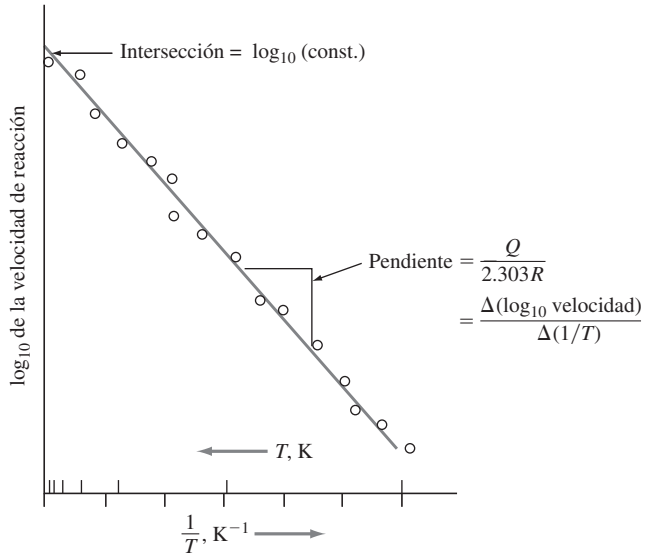


Figura 5.2
Representación típica de Arrhenius de datos de velocidad experimentales.
(Según J. Wulff et al., "Structure and Properties of Materials", vol. II: "Thermodynamics of Structure", Wiley, 1966, p. 64.)

5.2 DIFUSIÓN ATÓMICA EN SÓLIDOS

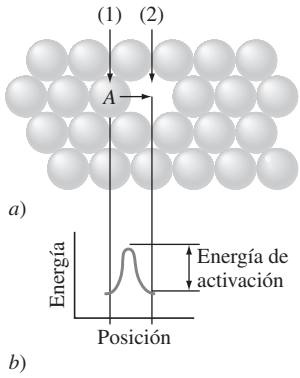
5.2.1 Difusión en sólidos en general

La difusión es el mecanismo por el cual la materia se transporta a través de la materia. Los átomos en los gases, líquidos y sólidos están en constante movimiento y emigran después de un periodo. En los gases, el movimiento atómico es relativamente rápido, prueba de ello es la aparición inmediata de olores al cocinar o las partículas de humo. El movimiento atómico en los líquidos en general es más lento que en los gases, como puede observarse cuando se vierte un colorante en agua líquida. El movimiento atómico en los sólidos está limitado por su enlace con posiciones de equilibrio. Sin embargo, las vibraciones térmicas que tienen lugar en los sólidos permiten que algunos átomos se muevan. La difusión de los átomos en los metales y aleaciones es particularmente importante, ya que, en su mayoría, las reacciones en estado sólido conllevan movimientos atómicos. Ejemplos de reacciones en estado sólido son la precipitación de una segunda fase a partir de soluciones sólidas (sección 9.5.1) y la nucleación y crecimiento de nuevos granos en la recristalización de un metal trabajado en caliente (sección 7.1.3).

5.2.2 Mecanismos de la difusión

Existen dos principales mecanismos de la difusión de los átomos en una red cristalina: 1) *mecanismo sustitucional o por vacantes* y 2) *mecanismo intersticial*.

Mecanismo de difusión sustitucional o por vacantes Los átomos pueden moverse en la red cristalina de una posición atómica a otra si tienen suficiente energía de acti-



Animación

Figura 5.3
Energía de activación asociada al movimiento de los átomos en un metal. *a*) La difusión del átomo *A* de cobre de la posición 1 en el plano (111) de una red cristalina de cobre a la posición 2 (una vacante), tendrá lugar si dispone de suficiente energía de activación como se indica en *b*).

vación procedente de sus vibraciones térmicas y si existen vacantes u otros defectos cristalinos en la red hacia las que los átomos puedan desplazarse. Las vacantes en los metales y aleaciones son defectos en equilibrio, y por ello siempre hay algunas presentes que posibilitan la **difusión sustitucional** de los átomos. Cuando se aumenta la temperatura del metal, hay más vacantes y más energía térmica disponible y por tanto la velocidad de difusión es superior a temperaturas más elevadas.

Considérese el ejemplo de difusión por vacantes que se muestra en la figura 5.3 para un plano (111) de átomos de cobre en una red cristalina de cobre. Si un átomo cercano a una vacante tiene suficiente energía de activación, puede moverse hasta la vacante y contribuirá así a la **autodifusión** de los átomos de cobre en la red. La energía de autodifusión es igual a la suma de la energía de activación para la formación de la vacante y la energía de activación para mover la vacante. En la tabla 5.1 se presentan algunas energías de autodifusión en metales puros. Nótese que, en general, al aumentar la temperatura de fusión del metal, también aumenta la energía de activación. Esta relación tiene lugar porque los metales de mayor temperatura de fusión tienen también elevadas energías de enlace entre sus átomos.

Durante la autodifusión o difusión sustitucional en estado sólido, los átomos deben romper sus enlaces iniciales con otros átomos y reemplazarlos por nuevos enlaces. Este proceso se facilita por la presencia de vacantes, por lo que puede tener lugar a menores energías de activación (figura 5.3). Para que este proceso ocurra en las aleaciones es necesario que haya solubilidad de un tipo de átomo en el otro. Así, este proceso depende de las reglas de solubilidad de los sólidos que se expusieron en la sección 4.3. Debido a las diferencias en los enlaces químicos, a la solubilidad en estado

Tabla 5.1 Energía de activación para la autodifusión de algunos metales puros

Metal	Punto de fusión (°C)	Estructura del cristal	Rango de temperatura estudiado (°C)	Energía de activación	
				kJ/mol	kcal/mol
Zinc	419	HCP	240–418	91.6	21.9
Aluminio	660	FCC	400–610	165	39.5
Cobre	1 083	FCC	700–990	196	46.9
Níquel	1 452	FCC	900–1 200	293	70.1
Hierro α	1 530	BCC	808–884	240	57.5
Molibdeno	2 600	BCC	2 155–2 540	460	110

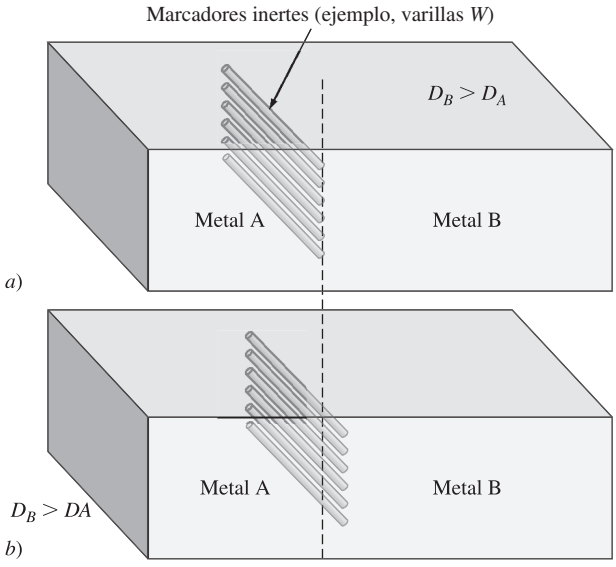


Figura 5.4
Experimento que muestra el efecto Kirkendall. *a*) Al inicio del experimento de difusión ($t = 0$). *b*) Después de un tiempo, *t*, los marcadores se mueven en dirección opuesta a las especies que se difunden más rápidamente, *B*.

sólido y a otros factores, los datos de la difusión sustitucional deben obtenerse por medios experimentales. Con el paso del tiempo estas medidas son cada vez más precisas, por ello estos datos pueden cambiar.

Uno de los mayores avances en las medidas de difusión tuvo lugar en 1940 cuando se descubrió el efecto de Kirkendall. Este efecto mostró que en un par de difusión binario (figura 5.4*a*) los marcadores en la intercara de difusión se desplazan ligeramente en dirección opuesta a la de las especies que se mueven más rápidamente (que se difunden más rápido). Después de un amplio debate se concluyó que es la presencia de vacantes la que permite que este fenómeno tenga lugar.

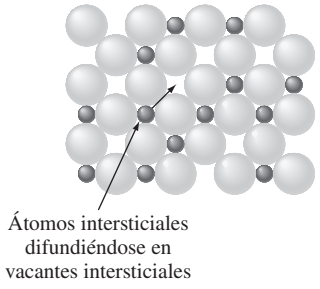
La difusión puede tener lugar también por el mecanismo de vacantes en disoluciones sólidas. Diferencias en el tamaño atómico y en las energías de enlace entre átomos son factores que afectan a la velocidad de difusión.

Mecanismos de difusión intersticial La **difusión intersticial** de los átomos en las redes cristalinas tiene lugar cuando los átomos se mueven de un sitio intersticial a otro intersticio vecino sin desplazar de manera permanente a ninguno de los átomos de la red cristalina de la matriz (figura 5.5). Para que el mecanismo intersticial sea operativo, el tamaño de los átomos que se difunden debe ser relativamente pequeño comparado con el de los átomos de la matriz. Los átomos pequeños como el hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y carbono se pueden difundir intersticialmente en algunas redes metálicas cristalinas. Por ejemplo, el carbono puede difundirse intersticialmente en hierro a BCC y en hierro γ FCC (véase figura 4.15*a*). En la difusión intersticial del carbono en hierro, los átomos de carbono deben pasar entre los átomos de la matriz de hierro.

5.2.3 Difusión en estado estacionario

Considérese la difusión de los átomos del soluto en la dirección x entre dos planos atómicos paralelos perpendiculares al papel separados por una distancia x, como se muestra en la figura 5.6. Supóngase que después un determinado periodo la concentración en el plano 1 es C_1 y que en el plano 2 es C_2. Esto significa que con el tiempo no existen cambios en la concentración de átomos del soluto en estos planos. Estas condiciones de difusión se conocen como **condiciones en estado estacionario**. Este tipo de difusión tiene lugar cuando un gas no reactivo se difunde a través de una lámina metálica. Por ejemplo, cuando el hidrógeno gas se difunde a través de una lámina de paladio se alcanzan las condiciones del estado estacionario si el hidrógeno gaseoso se encuentra a presión elevada en un lado y a baja presión en el otro.

Si en el sistema de difusión presentado en la figura 5.6 no existe interacción química entre los átomos del soluto y el disolvente, puesto que existe una diferencia de concentraciones entre los planos 1 y 2, habrá un flujo neto de átomos desde la concen-



Animación

Figura 5.5
Diagrama esquemático de una solución sólida intersticial. Los círculos grandes representan átomos de un plano (100) de una red cristalina FCC. Los círculos pequeños oscuros, son átomos intersticiales que ocupan posiciones intersticiales. Los átomos intersticiales se pueden mover a posiciones intersticiales adyacentes que estén vacantes. Existe una energía de activación asociada a la difusión intersticial.

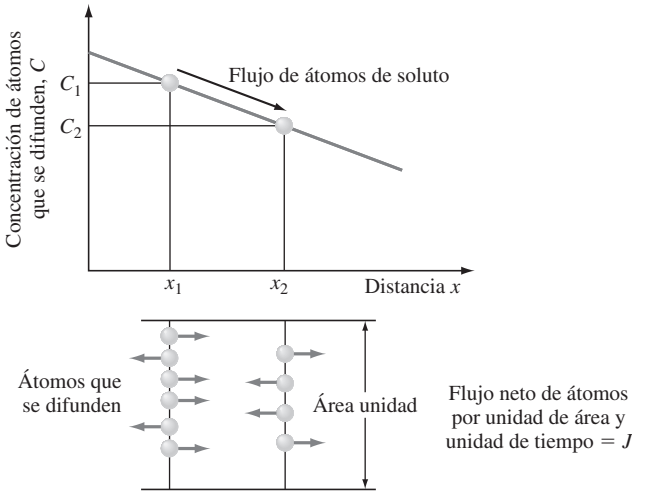


Figura 5.6
Difusión de átomos en estado estacionario en un gradiente de concentración. Un ejemplo es el hidrógeno gaseoso difundiéndose a través de una lámina de paladio metálico.

tración superior a la inferior. El *flujo* o corriente de átomos en este tipo de sistema puede representarse por la ecuación

$$J = -D\frac{dC}{dx} \tag{5.9}$$

donde J = flujo o corriente neta de átomos

D = constante de proporcionalidad llamada **difusividad** (conductividad atómica) o *capacidad de difusión*

$\frac{dC}{dx}$ = gradiente de concentración

Se utiliza un signo negativo porque la difusión tiene lugar de altas a bajas concentraciones; es decir, es un gradiente de difusión negativo.

Esta ecuación se llama **primera ley de la difusión de Fick**[2] y establece que para una difusión en estado estacionario (es decir, no hay cambio del sistema con el tiempo), el flujo neto de átomos por difusión atómica es igual al coeficiente de difusión D por el gradiente de difusión dC/dx. Las unidades SI para esta ecuación son:

$$J\left(\frac{\text{átomos}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}\right) = D\left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)\frac{dC}{dx}\left(\frac{\text{átomos}}{\text{m}^3} \times \frac{1}{\text{m}}\right) \tag{5.10}$$

En la tabla 5.2 se presentan algunos valores de coeficientes de difusión de algunos sistemas de difusión intersticial y sustitucional seleccionados. Los valores del coeficiente de difusión dependen de muchos factores, entre los cuales cabe destacar:

1. *Tipo de mecanismo de la difusión*. El que la difusión sea intersticial o sustitucional afectará al coeficiente de difusión. Los átomos pequeños se pueden difundir intersticialmente en la red cristalina de átomos del disolvente de gran tamaño. Por ejemplo, el carbono se difunde intersticialmente en las redes del hierro BCC o FCC. Los átomos de cobre se difunden sustitucionalmente en una red del aluminio puesto que los átomos de ambos, cobre y aluminio, son casi del mismo tamaño.

2. La *temperatura a la que tiene lugar la difusión* afecta de manera importante al valor del coeficiente de difusión. A medida que aumenta la temperatura, el coeficiente de difusión también aumenta, como se presenta en la tabla 5.2 para todos los sistemas comparando los valores de 500°C con los de 1 000°C. El efecto de la temperatura sobre el coeficiente de difusión se expondrá en la sección 5.4.

3. El *tipo de estructura cristalina de la red matriz* es importante. Por ejemplo, el coeficiente de difusión del carbono en hierro BCC es de 10^{-12} m^2/s, que es mucho mayor que 5×10^{-15} m^2/s, el valor del coeficiente de difusión del carbono en hierro FCC a la misma temperatura. La razón de esta diferencia es que la estructura cristalina BCC tiene un factor de empaquetamiento atómico de 0.68 comparado con el de la estructura cristalina FCC, que es de 0.74. Así, los espacios interatómicos entre los átomos de hierro son más anchos en la estructura cristalina BCC que en la FCC y de este modo los átomos de carbono se pueden difundir entre los átomos de hierro en la estructura BCC más fácilmente que en la estructura FCC.

4. El *tipo de defectos cristalinos presentes* en la región de difusión en estado sólido es también importante. Las estructuras más abiertas dan lugar a una más rápida difu-

[2] Adolf Eugen Fick (1829-1901). Fisiólogo alemán, fue el primero en presentar la difusión sobre una base cuantitativa utilizando ecuaciones matemáticas. Algunos de sus trabajos fueron publicados en *Annals of Physics (Leipzig)*, **170**:59 (1855).

Tabla 5.2 Difusiones a 500°C y 1 000°C para los sistemas seleccionados de difusión de soluto-solvente

Soluto	Disolvente (estructura de la matriz)	Capacidad de difusión (m^2/s) 500°C (930°F)	1 000°C (1 830°F)
1. Carbono	Hierro FCC	(5×10^{-15})*	3×10^{-11}
2. Carbono	Hierro BCC	10^{-12}	(2×10^{-9})
3. Hierro	Hierro FCC	(2×10^{-23})	2×10^{-16}
4. Hierro	Hierro BCC	10^{-20}	(3×10^{-14})
5. Níquel	Hierro FCC	10^{-23}	2×10^{-16}
6. Manganeso	Hierro FCC	(3×10^{-24})	10^{-16}
7. Zinc	Cobre	4×10^{-18}	5×10^{-13}
8. Cobre	Aluminio	4×10^{-14}	10^{-10} M†
9. Cobre	Cobre	10^{-18}	2×10^{-13}
10. Plata	Plata (cristalina)	10^{-17}	10^{-12} M
11. Plata	Plata (límite de grano)	10^{-11}	
12. Carbono	Titanio HCP	3×10^{-16}	(2×10^{-11})

*El paréntesis indica que la fase es metaestable.
†M–Calculado, aunque la temperatura está por encima del punto de fusión.
Fuente: L. H. Van Vlack, "Elements of Materials Science and Engineering", 5a. ed., Addison-Wesley, 1985.

sión de átomos. Por ejemplo, la difusión tiene lugar más rápidamente en los límites de grano que en el centro del grano en los metales y en las cerámicas. Un exceso de vacantes en los metales y las cerámicas incrementará la velocidad de difusión.

5. La *concentración de las especies que se difunden* es importante, ya que mayores concentraciones de los átomos del soluto que se difunde afectarán al coeficiente de difusión. Este aspecto de la difusión en estado sólido es muy complejo.

5.2.4 Difusión en estado no estacionario

En materiales de ingeniería, generalmente no se presenta el estado estacionario en que las condiciones no cambian con el tiempo. En la mayoría de los casos tiene lugar la **difusión en estado no estacionario**, en la cual la concentración del soluto varía con el tiempo de un punto a otro en el material. Por ejemplo, si se difunde carbono en la superficie de un árbol de levas de acero para endurecerla, la concentración del carbono bajo la superficie cambiará de un punto a otro con el tiempo a medida que el proceso de difusión avance. Para los casos de difusión en estado no estacionario, en que el coeficiente de difusión es independiente del tiempo, la **segunda ley de Fick aplicada a la difusión**, es

$$\frac{dC_x}{dt} = \frac{d}{dx}\left(D\frac{dC_x}{dx}\right) \tag{5.11}$$

Esta ley establece que la velocidad del cambio de composición es igual al coeficiente de difusión multiplicado por la velocidad de cambio del gradiente de concentración. La solución de esta ecuación diferencial está fuera del alcance de este libro. Sin embargo, una solución particular de esta ecuación para un gas que se difunde en un sólido es de gran importancia en algunos procesos de difusión en ingeniería y se utilizará para resolver algunos problemas de difusión industrial que se dan en la práctica.

Considérese el caso de un gas A difundiéndose en un sólido B, como se presenta en la figura 5.7*a*. A medida que aumenta el tiempo de difusión la concentración de átomos del soluto en cualquier punto del sólido en la dirección x también aumentará, como se indica para los tiempos t_1 y t_2 en la figura 5.7*b*. Si el coeficiente de difusión del gas A en el sólido B es independiente de la posición, entonces la solución a la segunda ley de Fick (ecuación 5.11) es

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \tag{5.12}$$

donde C_s = concentración superficial del elemento del gas que difunde en la superficie
C_0 = concentración inicial uniforme del elemento en el sólido
C_x = concentración del elemento a la distancia x de la superficie en el tiempo t
x = distancia desde la superficie
D = coeficiente de difusión del soluto que se difunde
t = tiempo
erf es una función matemática llamada función del error.

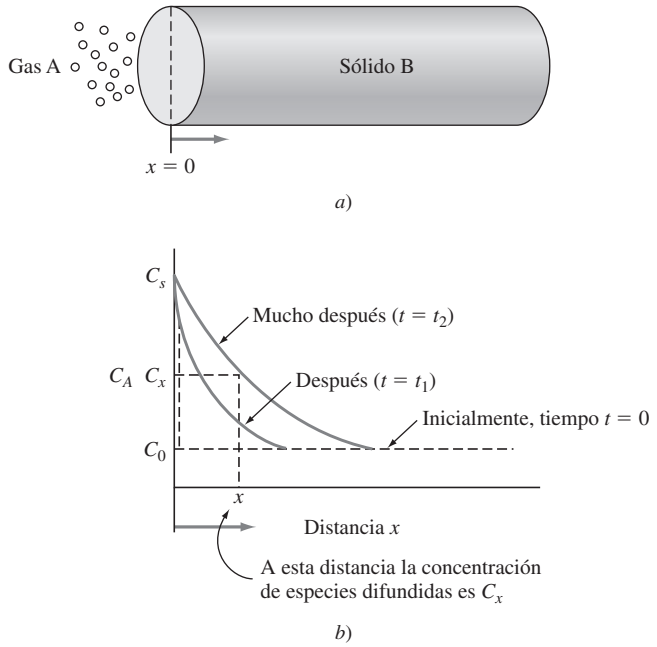


Figura 5.7
Difusión de un gas en un sólido. *a*) Difusión de un gas A en un sólido B en la superficie, donde $x = 0$. El gas mantiene una concentración de átomos de A, llamada C_s, en esta superficie. *b*) Perfiles de concentración del elemento A, a distintos tiempos a lo largo del sólido en la dirección x. Antes de que se inicie la difusión el sólido ya contiene una concentración uniforme del elemento A, C_0.

Tabla 5.3 Tabla de la función del error

z	erf z	z	erf z	z	erf z	z	erf z
0	0	0.40	0.4284	0.85	0.7707	1.6	0.9763
0.025	0.0282	0.45	0.4755	0.90	0.7970	1.7	0.9838
0.05	0.0564	0.50	0.5205	0.95	0.8209	1.8	0.9891
0.10	0.1125	0.55	0.5633	1.0	0.8427	1.9	0.9928
0.15	0.1680	0.60	0.6039	1.1	0.8802	2.0	0.9953
0.20	0.2227	0.65	0.6420	1.2	0.9103	2.2	0.9981
0.25	0.2763	0.70	0.6778	1.3	0.9340	2.4	0.9993
0.30	0.3286	0.75	0.7112	1.4	0.9523	2.6	0.9998
0.35	0.3794	0.80	0.7421	1.5	0.9661	2.8	0.9999

Fuente: R. A. Flinn y P. K. Trojan, "Engineering Materials and Their Applications", 2a. ed., Houghton Miffin, 1981, p. 137.

La función del error, erf, es la función matemática que existe por definición y se utiliza en algunas soluciones de la segunda ley de Fick. La función del error puede encontrarse en las tablas estándar de la misma forma que los senos y cosenos. En la tabla 5.3 se presenta en forma abreviada la función del error.

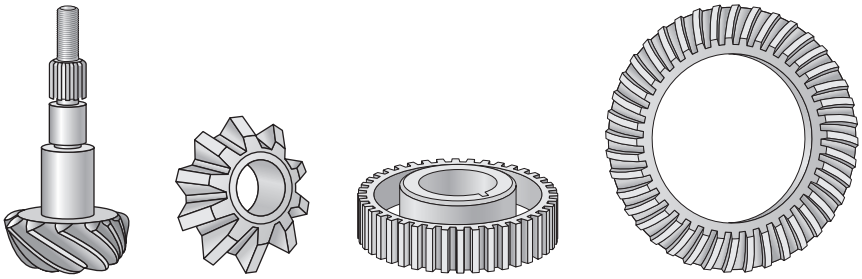
5.3 APLICACIONES INDUSTRIALES DE LOS PROCESOS DE DIFUSIÓN

Muchos procesos de manufactura industrial utilizan la difusión en estado sólido. En esta sección se consideran los siguientes dos procesos de difusión: 1) el de endurecimiento superficial del acero por carburización con gas, y 2) la introducción de impurezas en obleas de monocristales de silicio, para fabricar circuitos electrónicos integrados.

5.3.1 Endurecimiento superficial del acero por carburización con gas

Muchos componentes que se fabrican en acero y que serán sometidos a rotación o deslizamiento, tales como engranajes y ejes, deben tener una superficie dura que resista el desgaste, y un núcleo interno tenaz para resistir la fractura. En la fabricación de componentes de acero carburizados, normalmente el componente se maquina primero en condiciones de fácil maquinado, y luego la capa más externa se endurece por algún tratamiento como la carburización con gas. Los aceros carburizados son de bajo contenido en carbono: contienen entre 0.10 y 0.25% de C. Sin embargo, el contenido de elementos de aleación en los aceros carburizados puede variar considerablemente según sea la aplicación en que van a ser utilizados. En la figura 5.8 se muestran algunos componentes típicos carburizados con gas.

En la primera parte del proceso de carburización con gas, los componentes de acero se sitúan en un horno en contacto con gases que contienen metano (CH_4) u otros hidrocarburos gaseosos a aproximadamente 927°C (1 700°F). En la figura 5.9 se muestran algunos engranajes antes de ser carburizados con gas en un horno con una mezcla de nitrógeno-metanol como atmósfera. El carbono de la atmósfera se difunde a través de la superficie del engranaje, de modo que después de un tratamiento térmico los engranajes tienen las superficies endurecidas de alto contenido en carbono, como se indica en las áreas superficiales ennegrecidas de una macrosección de un engranaje mostrado en la figura 5.10.



Parte 1
3.0 pulg long

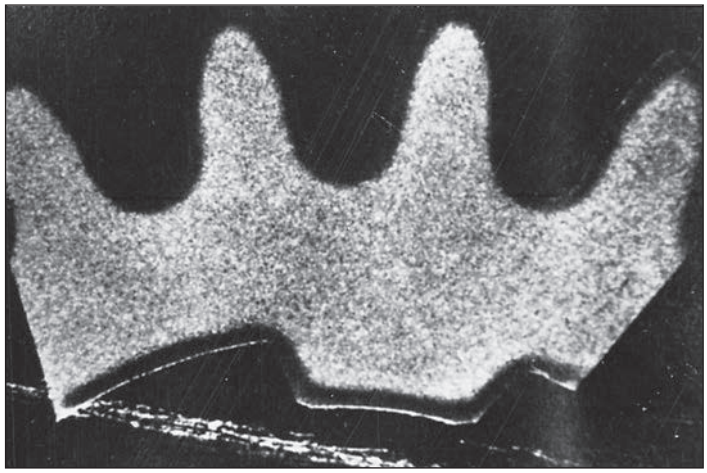
Parte 2
2.6 pulg diam

Parte 3
4.5 pulg diam

Parte 4
7.75 pulg diam

Figura 5.8
Componentes típicos de acero carburizado con gas.
(Según "Metals Handbook", vol. 2: "Heat Treating", 8a. ed., American Society for Metals, 1964. p. 108.)

Figura 5.9
Piezas antes de ser cementadas en una atmósfera de nitrógeno-metanol.
(Según B. J. Sheehy, Met. Prog., septiembre de 1981, p. 120.)



Animación

Figura 5.10
Macrosección de un piñón de un engranaje SAE 8620 carburizado con nitrógeno-metanol.
(Según B. J. Sheehy, Met. Prog., septiembre de 1981, p. 120.)

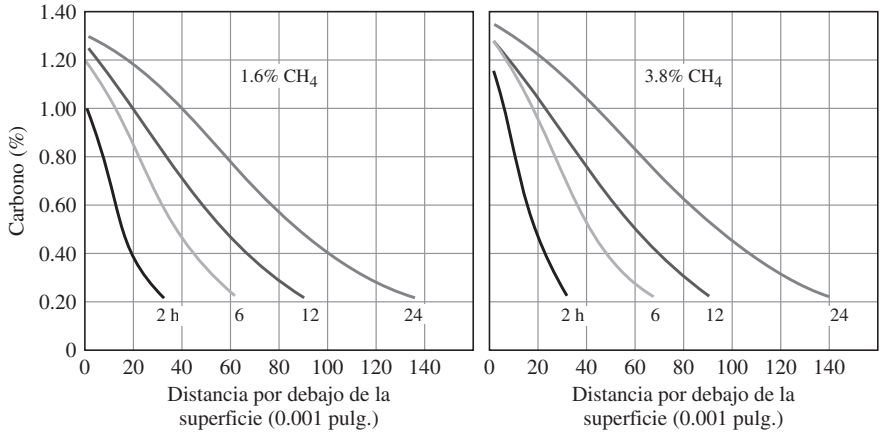


Figura 5.11
Gradientes de carbono en probetas de un acero 1022 carburizado a 918°C (1 685°F) en un gas con 20% CO–40% H_2, al que se ha añadido 1.6 y 3.8% de metano (CH_4), respectivamente.
(Según "Metal Handbook", vol. 2: "Heat Treating", 8a. ed., American Society for Metals, 1964, p. 100.)

En la figura 5.11 se muestran algunos gradientes de carbono típicos en probetas de acero bajo en carbono AISI 1022 (0.22% de C) carburizado a 1 685°F (918°C) en una atmósfera carburizante con 20% de CO. Obsérvese cómo el tiempo de carburación afecta de manera importante al contenido en carbono en función de la distancia a la superficie. Los problemas de ejemplo 5.2 y 5.3 muestran cómo puede utilizarse la ecuación de difusión (5.12) para determinar una variable desconocida, como el tiempo de difusión o el contenido de carbono a una determinada distancia por debajo de la superficie del componente que está siendo carburizado.

PROBLEMA DE EJEMPLO 5.2

Considere el gas carburizante de un engranaje de acero 1020 a 927°C (1 700°F). Calcule el tiempo en minutos necesario para incrementar el contenido en carbono a 0.40%, a 0.50 mm debajo de la superficie. Suponga que el contenido de carbono en la superficie es de 0.90% y que el acero tiene un contenido nominal en carbono de 0.20 por ciento.

$$D_{927°C} = 1.28 \times 10^{-11}\ \text{m}^2/\text{s}$$

■ Solución

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \qquad \textbf{(5.12)}$$

$C_s = 0.90\%$ $\qquad x = 0.5\ \text{mm} = 5.0 \times 10^{-4}\ \text{m}$

$C_0 = 0.20\%$ $\qquad D_{927°C} = 1.28 \times 10^{-11}\ \text{m}^2/\text{s}$

$C_x = 0.40\%$ $\qquad t = ?\ \text{s}$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 5.12, resulta

$$\frac{0.90 - 0.40}{0.90 - 0.20} = \text{erf}\left[\frac{5.0 \times 10^{-4}\ \text{m}}{2\sqrt{(1.28 \times 10^{-11}\ \text{m}^2/\text{s})(t)}}\right]$$

$$\frac{0.50}{0.70} = \text{erf}\left(\frac{69.88}{\sqrt{t}}\right) = 0.7143$$

Si

$$Z = \frac{69.88}{\sqrt{t}} \text{ entonces erf } Z = 0.7143$$

Es necesario un número Z cuya función de error (erf) sea 0.7143. En la tabla 5.3 se encuentra este número por interpolación, que es 0.755:

erf Z	**Z**
0.7112	0.75
0.7143	*x*
0.7421	0.80

$$\frac{0.7143 - 0.7112}{0.7421 - 0.7112} = \frac{x - 0.75}{0.80 - 0.75}$$

$$x - 0.75 = (0.1003)(0.05)$$

$$x = 0.75 + 0.005 = 0.755$$

Así,

$$Z = \frac{69.88}{\sqrt{t}} = 0.755$$

$$\sqrt{t} = \frac{69.88}{0.755} = 92.6$$

$$t = 8\,567\ \text{s} = 143\ \text{min} \blacktriangleleft$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 5.3

Considere el gas carburizante de un engranaje de acero 1020 a 927°C (1 700°F) como en el problema de ejemplo 5.2. Calcule en este problema el *contenido de carbono* a 0.50 mm por debajo de la superficie de la pieza durante un periodo de carburización de 5 h. Tenga en cuenta que el carbono contenido en la superficie del engranaje es de 0.90% y que la pieza tiene un contenido nominal de 0.20% de carbono.

■ **Solución**

$$D_{927°C} = 1.28 \times 10^{-11}\ m^2/s$$

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \qquad \textbf{(5.12)}$$

$C_s = 0.90\%$ $\quad x = 0.50\ mm = 5.0 \times 10^{-4}\ m$

$C_0 = 0.20\%$ $\quad D_{927°C} = 1.28 \times 10^{-11}\ m^2/s$

$C_x = ?\%$ $\quad t = 5\ h = 5\ h \times 3\,600\ s/h = 1.8 \times 10^4\ s$

$$\frac{0.90 - C_x}{0.90 - 0.20} = \text{erf}\left[\frac{5.0 \times 10^{-4}\ m}{2\sqrt{(1.28 \times 10^{-11}\ m/s)(1.8 \times 10^4\ s)}}\right]$$

$$\frac{0.90 - C_x}{0.70} = \text{erf}\ 0.521$$

Puesto que $Z = 0.521$. Es necesario saber cuál es la función de error que corresponde al valor de Z de 0.521. Para determinar este número a partir de la tabla 5.3, se debe interpolar el dato como se muestra en el cuadro adjunto.

Z	erf Z
0.500	0.5205
0.521	x
0.550	0.5633

$$\frac{0.521 - 0.500}{0.550 - 0.500} = \frac{x - 0.5205}{0.5633 - 0.5205}$$

$$0.42 = \frac{x - 0.5205}{0.0428}$$

$$x - 0.5205 = (0.42)(0.0428)$$

$$x = 0.0180 + 0.5205$$

$$= 0.538$$

Por tanto,

$$\frac{0.90 - C_x}{0.70} = \text{erf}\ 0.521 = 0.538$$

$$C_x = 0.90 - (0.70)(0.538)$$

$$= 0.52\% \blacktriangleleft$$

Observe que al incrementar el tiempo de carburización de 2.4 a 5 h para el acero 1020, el contenido de carbono a 0.5 mm por debajo de la superficie del engranaje aumenta sólo de 0.4 a 0.52 por ciento.

5.3.2 Difusión de impurezas en obleas de silicio para circuitos integrados

La difusión de impurezas en obleas de silicio para cambiar sus características de conductividad eléctrica es una fase importante en la producción de los circuitos electrónicos integrados modernos. En un método de difusión de impurezas en discos de silicio, la superficie se expone al vapor de una impureza apropiada a una temperatura de unos 1 100°C en un horno de tubo de cuarzo, tal como se muestra en la figura 5.12. El inge-

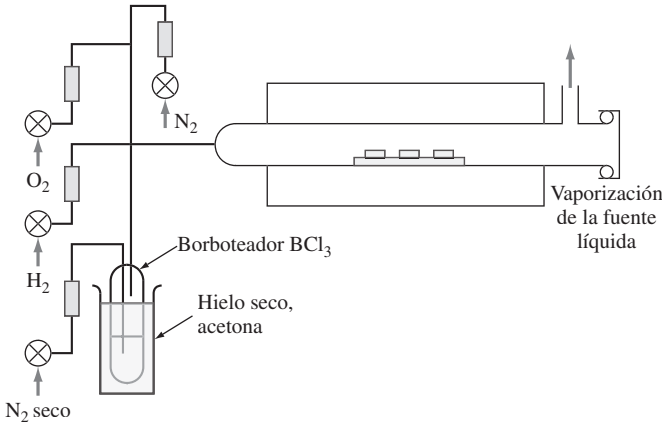


Figura 5.12
Método para difundir boro en obleas de silicio.
(Según W. R. Runyan, "Silicon Semiconductor Technology", McGraw-Hill, 1965.)

Figura 5.13
Cargando una rejilla de obleas de silicio en un horno tubular para la difusión de impurezas.
(Cortesía de Harris Corporation.)

niero de diseño debe proteger la parte de la superficie de silicio no expuesta a la difusión de impurezas para que la impureza difusora actúe en las partes seleccionadas para los cambios de conductividad. En la figura 5.13 se muestra a un técnico cargando una rejilla de obleas de silicio en un horno tubular para la difusión de las impurezas.

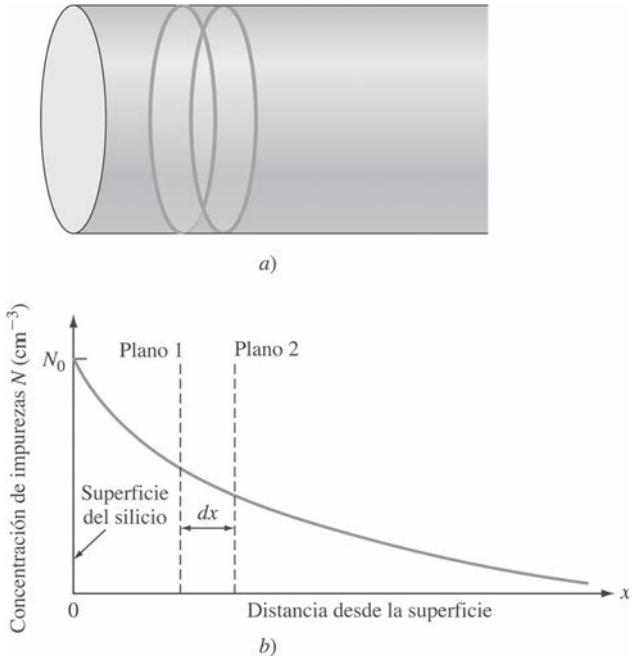


Figura 5.14
Difusión de impurezas en una oblea de silicio desde una cara. *a*) La oblea de silicio de espesor muy exagerado posee una concentración de impurezas que disminuye desde la cara izquierda hacia el interior. *b*) Representación gráfica de la misma distribución de impurezas.
(Según R. M. Warner, "Integrated Circuits", McGraw-Hill, 1965, p. 70.)

Como en el caso de carburización con gas de una superficie de acero, la concentración de las impurezas difundidas en las superficies del silicio disminuye al aumentar la profundidad de la penetración, como se muestra en la figura 5.14. Cambiando el tiempo de difusión también cambiará la concentración de las impurezas *versus* el perfil de profundidad de penetración, como se muestra cualitativamente en la figura 5.7. El problema de ejemplo 5.3 muestra cómo se puede utilizar cuantitativamente la ecuación 5.12 para determinar una variable desconocida, tal como el tiempo de difusión o la profundidad de la penetración para un nivel de concentración particular.

PROBLEMA DE EJEMPLO 5.4

Considere la difusión de impurezas de galio en una oblea de silicio. Si el galio se difunde en una oblea de silicio que anteriormente no tenía galio, a una temperatura de 1 100°C durante 3 h, ¿cuál es la profundidad por debajo de la superficie a la cual la concentración es de 10^{22} átomos/m^3 si la concentración en la superficie es de 10^{24} átomos/m^3? Para la difusión de galio en silicio a 1 100°C, la solución es como sigue:

■ **Solución**

$$D_{1\,100°C} = 7.0 \times 10^{-17}\ \text{m}^2/\text{s}$$

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \qquad \textbf{(5.12)}$$

$C_s = 10^{24}$ átomos/m^3 $\quad x = ?\text{m}$ (profundidad a la que $C_x = 10^{22}$ átomos/m^3)

$C_x = 10^{22}$ átomos/m^3 $\quad D_{1\,100°C} = 7.0 \times 10^{-17}$ m^2/s

$C_0 = 0$ átomos/m^3 $\quad t = 3\ \text{h} = 3\ \text{h} \times 3\,600\ \text{s/h} = 1.08 \times 10^4\ \text{s}$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 5.12, se obtiene

$$\frac{10^{24} - 10^{22}}{10^{24} - 0} = \text{erf}\left[\frac{x\ \text{m}}{2\sqrt{(7.0 \times 10^{-17}\ \text{m}^2/\text{s})(1.08 \times 10^4\ \text{s})}}\right]$$

$$1 - 0.01 = \text{erf}\left(\frac{x\ \text{m}}{1.74 \times 10^{-6}\ \text{m}}\right) = 0.99$$

Si $$Z = \frac{x}{1.74 \times 10^{-6}\ \text{m}}$$

Así, $$\text{erf}\, Z = 0.99 \quad \text{y} \quad Z = 1.82$$

(a partir de la tabla 5.3 por interpolación). Por tanto,

$$x = (Z)(1.74 \times 10^{-6}\ \text{m}) = (1.82)(1.74 \times 10^{-6}\ \text{m})$$
$$= 3.17 \times 10^{-6}\ \text{m} \blacktriangleleft$$

Nota: Las profundidades típicas de la difusión en obleas de silicio son del orden de unos pocos micrómetros (es decir, alrededor de 10^{-6} m), mientras que la oblea posee normalmente varios cientos de micrómetros de espesor.

5.4 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA DIFUSIÓN EN LOS SÓLIDOS

Puesto que la difusión atómica implica movimientos atómicos, es de esperar que el aumento de la temperatura de un sistema de difusión incremente la velocidad de difusión. Experimentalmente se ha encontrado que la dependencia de la velocidad de difusión de la temperatura de muchos sistemas de difusión, puede expresarse por un tipo de ecuación como la de Arrhenius:

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \qquad \textbf{(5.13)}$$

donde D = capacidad de difusión, m^2/s

D_0 = constante de proporcionalidad, m^2/s, independiente de la temperatura en el intervalo en que la ecuación es válida

Q = energía de activación de las especies en difusión, J/mol o cal/mol

R = constante molar de los gases
= 8.314 J/(mol · K) o 1.987 cal/(mol · K)

T = temperatura, K

El problema de ejemplo 5.4 aplica la ecuación 5.13 para la determinación la capacidad de difusión del carbono que se difunde en el hierro γ a 927°C, cuando se conocen los valores de D_0 y de la energía de activación Q.

PROBLEMA DE EJEMPLO 5.5

Calcule el valor la capacidad de difusión D en metros cuadrados por segundo para la difusión del carbono en hierro γ (FCC) a 927°C (1 700°F). Utilice los valores de $D_0 = 2.0 \times 10^{-5}$ m^2/s, $Q = 142$ kJ/mol, y $R = 8.314$ J/(mol · K).

■ **Solución**

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \tag{5.13}$$

$$= (2.0 \times 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}) \left\{ \exp \frac{-142\,000\ \text{J/mol}}{[8.314\ \text{J/(mol} \cdot \text{K)}](1\,200\ \text{K})} \right\}$$

$$= (2.0 \times 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s})(e^{-14.23})$$

$$= (2.0 \times 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s})(0.661 \times 10^{-6})$$

$$= 1.32 \times 10^{-11}\ \text{m}^2/\text{s} \blacktriangleleft$$

La ecuación de difusión $D = D_0 e^{-Q/RT}$ (ecuación 5.13) puede escribirse en forma logarítmica como la ecuación de una recta, del mismo modo que lo fueron las ecuaciones 5.6 y 5.8 para la ecuación general de la ley de Arrhenius para la velocidad:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{Q}{RT} \tag{5.14}$$

o

$$\log_{10} D = \log_{10} D_0 - \frac{Q}{2.303RT} \tag{5.15}$$

Tabla 5.4 Valores de la capacidad de difusión para algunos sistemas metálicos

			Q	
Soluto	**Disolvente**	D_0**(m^2/s)**	**kJ/mol**	**kcal/mol**
Carbono	Hierro FCC	2.0×10^{-5}	142	34.0
Carbono	Hierro BCC	22.0×10^{-5}	122	29.3
Hierro	Hierro FCC	2.2×10^{-5}	268	64.0
Hierro	Hierro BCC	20.0×10^{-5}	240	57.5
Níquel	Hierro FCC	7.7×10^{-5}	280	67.0
Manganeso	Hierro FCC	3.5×10^{-5}	282	67.5
Zinc	Cobre	3.4×10^{-5}	191	45.6
Cobre	Aluminio	1.5×10^{-5}	126	30.2
Cobre	Cobre	2.0×10^{-5}	197	47.1
Plata	Plata	4.0×10^{-5}	184	44.1
Carbono	Titanio HCP	51.0×10^{-5}	182	43.5

Fuente: Datos de L. H. Van Vlack, "Elements of Materials Science and Engineering", 5a. ed., Addison-Wesley, 1985.

Si los valores de la capacidad de difusión para un sistema de difusión se determinan para dos temperaturas, los valores Q y D_0 pueden determinarse resolviendo simultáneamente dos ecuaciones del tipo de la ecuación 5.15. Si estos valores Q y D_0 se sustituyen en la ecuación 5.15, se puede obtener una ecuación general para $\log_{10} D$ *versus* a $1/T$ en el rango de temperatura investigado. El problema de ejemplo 5.5 muestra cómo puede calcularse directamente la energía de activación para un sistema binario de difusión utilizando la relación $D = D_0 e^{-Q/RT}$ (ecuación 5.13) cuando se conocen los coeficientes de difusión para las dos temperaturas.

En la tabla 5.4 se muestran los valores de Q y D_0 para algunos sistemas metálicos utilizados para obtener los gráficos de la capacidad de difusión de Arrhenius representados en la figura 5.15. En la figura 5.16 se muestran unas curvas similares para la difusión de impurezas en silicio, lo cual sirve para la fabricación de circuitos integrados en la industria electrónica.

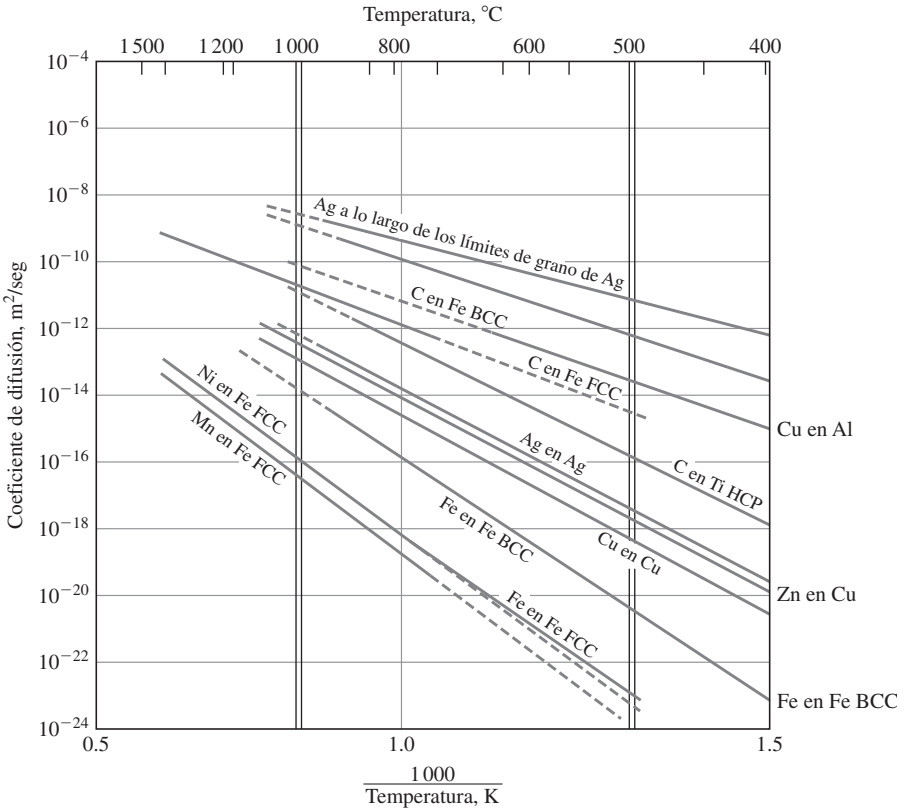


Figura 5.15
Gráficas de Arrhenius mostrando los datos de la capacidad de difusión para algunos sistemas metálicos.
(Según L. H. Van Vlack, "Elements of Materials Science and Engineering", 5a. ed., Addison-Wesley, 1985. p. 137.)

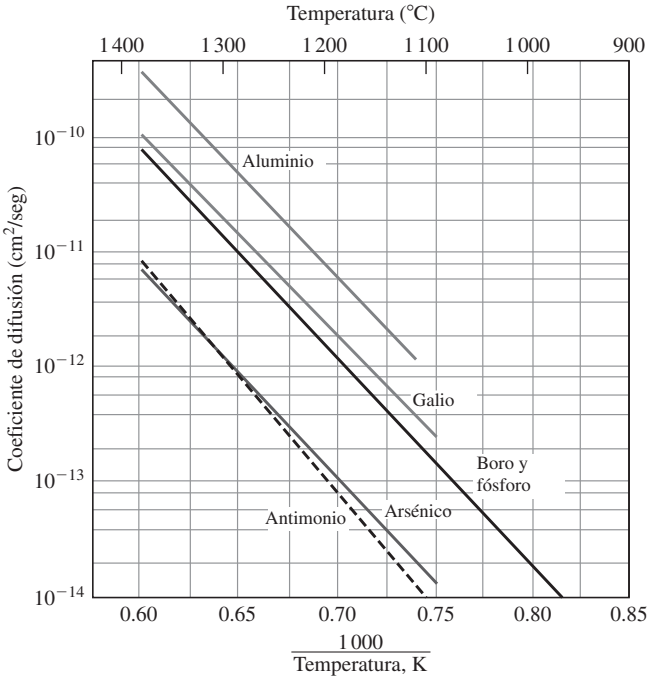


Figura 5.16
Coeficientes de difusión en función de la temperatura para algunas impurezas elementales en silicio.
[Según C. S. Fuller y J. A. Ditzenberger, J. Appl. Phys., 27:544(1956).]

PROBLEMA DE EJEMPLO 5.6

El coeficiente de difusión de átomos de plata en la plata metálica es de 1.0×10^{-17} m²/s a 500°C y 7.0×10^{-13} m²/s a 1 000°C. Calcule la energía de activación (julios por mol) para la difusión de Ag en Ag en el intervalo de temperaturas de 500 a 1 000°C.

Solución

Utilizando la ecuación 5.13, $T_2 = 1\,000°C + 237 = 1\,273$ K, $T_1 = 500°C + 273 = 773$ K, y $R = 8.314$ J/(mol · K):

$$\frac{D_{1\,000°C}}{D_{500°C}} = \frac{\exp(-Q/RT_2)}{\exp(-Q/RT_1)} = \exp\left[-\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right]$$

$$\frac{7.0 \times 10^{-13}}{1.0 \times 10^{-17}} = \exp\left\{-\frac{Q}{R}\left[\left(\frac{1}{1\,273\text{ K}} - \frac{1}{773\text{ K}}\right)\right]\right\}$$

$$\ln(7.0 \times 10^4) = -\frac{Q}{R}(7.855 \times 10^{-4} - 12.94 \times 10^{-4}) = \frac{Q}{8.314}(5.08 \times 10^{-4})$$

$$11.16 = Q(6.11 \times 10^{-5})$$

$$Q = 183\,000 \text{ J/mol} = 183 \text{ kJ/mol} \blacktriangleleft$$

5.5 RESUMEN

La difusión atómica tiene lugar en los sólidos metálicos principalmente por 1) una vacante o mecanismo de sustitución y 2) un mecanismo intersticial. En el mecanismo por vacantes, átomos con aproximadamente el mismo tamaño saltan de una posición a otra, utilizando las posiciones atómicas vacantes. En el mecanismo intersticial, átomos muy pequeños se mueven a través de los espacios intersticiales entre los grandes átomos que forman la matriz. La primera ley de Fick de la difusión establece que la difusión tiene lugar debido a una diferencia de concentración de la especie que se difunde de un lugar a otro y es aplicable en condiciones de estado estacionario (es decir, condiciones que no cambian con el tiempo). La segunda ley de Fick de la difusión es aplicable para condiciones en estado no estacionario (por ejemplo, condiciones en que la concentración de la especie que se difunde cambia con el tiempo). En este libro la utilización de la segunda ley de Fick se ha limitado al caso de un gas que se difunde dentro de un sólido. La velocidad de difusión depende mucho de la temperatura, y esta dependencia se expresa por la capacidad de difusión, que es una medida de la velocidad de difusión: La capacidad de difusión: $D = D_0 e^{-Q/RT}$. Los procesos de la difusión se utilizan habitualmente en la industria. En este capítulo se ha examinado el proceso de carburación con gas para el endurecimiento de la superficie del acero, y la difusión de cantidades controladas de impurezas dentro de obleas de silicio para fabricar circuitos integrados.

5.6 DEFINICIONES

Sección 5.1

Energía de activación: la energía suplementaria necesaria, por encima de la energía promedio, para que ocurra una reacción activada térmicamente.

Ecuación de Arrhenius para la velocidad: ecuación empírica que describe la velocidad de una reacción como una función de la temperatura y de la barrera de energía de activación.

Sección 5.2

Difusión sustitucional: la migración de los átomos de soluto en la red del disolvente en la que los átomos de soluto y de disolvente son aproximadamente del mismo tamaño. La presencia de vacantes hace posible la difusión.

Autodifusión: la migración de átomos en un metal puro.

Difusión intersticial: la migración de átomos intersticiales en una red de átomos matriz.

Primera ley de Fick de la difusión en sólidos: el flujo de las especies que se difunden, a temperatura constante, es proporcional al gradiente de concentración.

Segunda ley de Fick de la difusión en sólidos: la velocidad del cambio de composición, a temperatura constante, es igual al producto de la capacidad de difusión por la velocidad de cambio del gradiente de concentración.

Capacidad de difusión: medida de la velocidad de difusión en los sólidos a temperatura constante. El coeficiente de difusión D puede expresarse por la ecuación $D = D_0 e^{-Q/RT}$, donde Q es la energía de activación y T es la temperatura en grados Kelvin. D_0 y R son constantes.

Condiciones de estado estacionario: para un sistema en difusión, la concentración de las especies que se difunden no varía con el tiempo en los diferentes puntos del sistema.

Condiciones de estado no estacionario: para un sistema en difusión, la concentración de las especies que se difunden varía con el tiempo en los distintos puntos del sistema.

5.7 PROBLEMAS

Las respuestas a los problemas marcados con un asterisco se encuentran al final del libro.

5.1 ¿Qué es un proceso activado térmicamente? ¿Qué es la energía de activación para un proceso como éste?

5.2 Escriba una ecuación para el número de vacantes en equilibrio que presenta un metal a una temperatura determinada y defina cada uno de los términos. Indique las unidades para cada término y utilice voltios de electrón para la energía de activación.

***5.3** *a*) Calcule el número de vacantes en equilibrio por metro cúbico en el cobre puro a 850°C. Considere que la energía de formación de una vacante en el cobre puro es de 1.00 eV. *b*) ¿Cuál es la fracción de vacantes a 800°C?

5.4 *a*) Calcule el número de vacantes en equilibrio por metro cúbico de plata pura a 750°C. Considere que la energía de formación de una vacante en plata pura es de 1.10 eV. *b*) ¿Cuál es la fracción de vacantes a 700°C?

5.5 Escriba la ecuación de Arrhenius para la velocidad en la forma *a*) exponencial y *b*) en logaritmos neperianos comunes.

5.6 Dibuje una gráfica típica de Arrhenius de $\log_{10}$ de la velocidad de reacción *versus* al recíproco de la temperatura absoluta e indique la pendiente de la gráfica.

5.7 Describa los mecanismos de difusión sustitucional e intersticial en los metales sólidos.

5.8 Escriba la ecuación de la primera ley de Fick de la difusión y defina cada uno de los términos en unidades SI.

5.9 ¿Qué factores afectan a la velocidad de difusión en cristales metálicos?

5.10 Escriba la ecuación de la segunda ley de Fick de difusión en sólidos y defina cada uno de los términos.

5.11 Escriba la ecuación para la solución de la segunda ley de Fick para la difusión de un gas a través de la superficie de una red cristalina de un sólido metálico.

5.12 Describa el proceso de carburización con gas para piezas de acero. ¿Por qué se realiza la carburización de piezas de acero?

***5.13** Considere la carburización de un engranaje de acero 1018 (0.18% en peso) a 927°C (1700°F). Calcule el tiempo necesario para incrementar el contenido a 0.35% en peso a 0.40 mm por debajo de la superficie del engranaje. Suponga que el contenido en carbono en la superficie del engranaje es de 1.15% en peso y que el contenido nominal de carbono en el engranaje antes de carburizar es de 0.18% en peso. D (C en hierro γ) a 927°C $= 1.28 \times 10^{-11}$ m^2/s.

5.14 La superficie de un engranaje fabricado en acero 1022 (0.22% en peso C) se carburiza a 927°C (1700°F). Calcule el tiempo necesario para incrementar el contenido a 0.30% en peso a 0.030 pulgadas por debajo de la superficie del engranaje. Suponga que el contenido en carbono en la superficie es de 1.20% en peso. D (C en hierro γ) a 927°C $= 1.28 \times 10^{-11}$ m^2/s.

5.15 Un engranaje fabricado en acero 1020 (0.20% en peso C) se carburiza a 927°C (1700°F). Calcule el contenido en carbono a 0.90 mm por debajo de la superficie del engranaje después de 4 horas de carburización. Suponga que el contenido de carbono en la superficie es de 1.00% en peso. D (C en hierro γ) a 927°C $= 1.28 \times 10^{-11}$ m^2/s.

***5.16** Un engranaje fabricado en acero 1020 (0.20% en peso C) se carburiza a 927°C (1700°F). Calcule el contenido en carbono a 0.40 pulgadas por debajo de la superficie del engranaje después de 7 horas de carburización. Suponga que el contenido de carbono en la superficie es de 1.15% en peso. D (C en hierro γ) a 927°C $= 1.28 \times 10^{-11}$ m^2/s.

***5.17** La superficie de un engranaje fabricado en acero 1018 (0.18% en peso C) se carburiza a 927°C. Calcule el tiempo necesario para incrementar el contenido en

carbono a 0.35% en peso a 1.00 mm por debajo de la superficie del engranaje. Suponga que el contenido en carbono en la superficie es de 1.20% en peso. D (C en hierro γ) a 927°C = 1.28×10^{-11} m^2/s.

5.18 Un engranaje fabricado en acero 1020 (0.20% en peso C) se carburiza a 927°C. Calcule el contenido en carbono a 0.95 mm por debajo de la superficie del engranaje después de 8 horas de carburización. Suponga que el contenido de carbono en la superficie es de 1.25% en peso. D (C en hierro γ) a 927°C = 1.28×10^{-11} m^2/s.

***5.19** Un engranaje fabricado en acero 1018 (0.18% en peso C) se carburiza a 927°C. Si el tiempo de carburización es de 7.5 h, ¿a qué profundidad en mm el contenido en carbono será de 0.40% en peso? Suponga que el contenido en la superficie es de 1.20% en peso. D (C en hierro γ) a 927°C = 1.28×10^{-11} m^2/s.

***5.20** Si se difunde boro en una oblea gruesa de silicio sin contenido previo de boro a la temperatura de 1100°C durante 5 h, ¿cuál es la profundidad por debajo de la superficie en que la concentración es de 10^{17} átomos/cm^3 si la concentración en la superficie es de 10^{18} átomos/cm^3? $D = 4 \times 10^{-13}$ cm^2/s para la difusión del boro en silicio a 1100°C.

5.21 Si se difunde aluminio en una oblea gruesa de silicio sin contenido previo de aluminio a la temperatura de 1100°C durante 6 h, ¿cuál es la profundidad por debajo de la superficie en que la concentración es de 10^{16} átomos/cm^3 si la concentración en superficie es de 10^{18} átomos/cm^3? $D = 2 \times 10^{-12}$ cm^2/s para la difusión del aluminio en silicio a 1100°C.

5.22 Se difunde fósforo en una oblea gruesa de silicio sin contenido previo de fósforo a una temperatura de 1100°C. Si la concentración de fósforo es de 1×10^{18} átomos/cm^3 y su concentración a 1 μm de la superficie es de 1×10^{15} átomos/cm^3, ¿cuánto tiempo ha durado la difusión? $D = 3 \times 10^{-13}$ cm^2/s para la difusión del P en Si a 1100°C.

***5.23** Si en el problema de ejemplo 5.22 el coeficiente de difusión fuera de 1.5×10^{-13} cm^2/s. ¿a qué profundidad, en micrómetros, encontraríamos una concentración de fósforo de 1×10^{15} átomos/cm^3?

5.24 Se difunde arsénico en una oblea gruesa de silicio sin contenido previo de arsénico a la temperatura de 1100°C. Si la concentración en superficie es de 5.0×10^{18} átomos/cm^3 y su concentración a 1.2 μm de la superficie es de 1.5×10^{16} átomos/cm^3, ¿cuánto tiempo ha durado la difusión? ($D = 3.0 \times 10^{-14}$ cm^2/s para la difusión del As en Si a 1100°C.)

***5.25** Calcule la capacidad de difusión D en metros cuadrados por segundo para la difusión del níquel en hierro FCC a 1100°C. Utilice los valores de $D_0 = 7.7 \times 10^{-5}$ m^2/s; $Q = 280$ kJ/mol; $R = 8.314$ J/(mol · K).

***5.26** Calcule la capacidad de difusión en m^2/s del carbono en titanio HCP a 700°C. Utilice $D_0 = 5.10 \times 10^{-4}$ m^2/s; $Q = 182$ kJ/mol; $R = 8.314$ J/(mol · K).

5.27 Calcule la capacidad de difusión en m^2/s para la difusión del zinc en cobre a 350°C. Utilice $D_0 = 3.4 \times 10^{-5}$ m^2/s; $Q = 191$ kJ/mol.

5.28 La capacidad de difusión de los átomos de manganeso en la red del hierro FCC es de 1.50×10^{-14} m^2/s a 1300°C y 1.50×10^{-15} m^2/s a 400°C. Calcule la energía de activación en kJ/mol para este intervalo de temperatura. Dato: $R = 8.314$ J/(mol · K).

***5.29** La capacidad de difusión de los átomos de cobre en la red del aluminio es de 7.50×10^{-13} m^2/s a 600°C y de 2.50×10^{-15} m^2/s a 400°C. Calcule la energía de activación en kJ/mol para este intervalo de temperatura. [$R = 8.314$ J/(mol · K).]

5.30 La capacidad de difusión de los átomos de hierro en la red del hierro BCC es de 4.5×10^{-23} m^2/s a 400°C y de 5.9×10^{-16} m^2/s a 800°C. Calcule la energía de activación en kJ/mol para este intervalo de temperatura. [$R = 8.314$ J/(mol · K).]

5.8 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. En la fabricación de los circuitos integrados, se unen en sección transversal metales distintos como el oro y aluminio para formar una intercara unida. A temperaturas elevadas, la intercara empieza a moverse o desplazarse en la dirección de uno de los metales, esto se conoce como el efecto Kirkendall. *a*) ¿Puede explicar este fenómeno? *b*) ¿La dirección del desplazamiento es al azar? *c*) ¿Cuáles son los efectos negativos de este proceso?

2. *a*) Diseñe un proceso que le permita obtener un componente de acero sólido a partir de polvo fino de acero. La densidad del sólido formado debe estar próxima a la densidad del metal. *b*) Explique cómo este proceso tiene lugar tanto a nivel micro como macro. *c*) ¿Cuáles son algunas de las dificultades que puede encontrar en este proceso?

3. Explique qué sucede cuando el acero al carbono se expone a una atmósfera rica en oxígeno a elevada temperatura en un horno.

4. Basándose en los datos de la tabla 5.2, ¿es más fácil que se difundan átomos de carbono en la estructura de hierro BCC o hierro FCC? ¿Cuál es la razón física para ello?

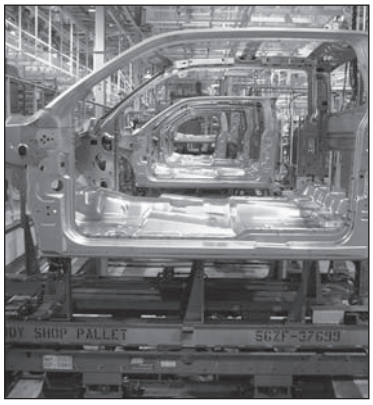
5. Clasifique los mecanismos de difusión de los 12 pares soluto/disolvente dados en la tabla 5.2 (intersticial o sustitucional). Compare los valores del coeficiente de difusión y establezca una conclusión.

6. La energía de activación para la difusión del hidrógeno en el acero a temperatura ambiente es de 3 600 cal/mol, significativamente inferior a, por ejemplo, la del carbón, que es de 20 900 cal/mol. Investigue el efecto del hidrógeno que se difunde en el comportamiento mecánico del acero.

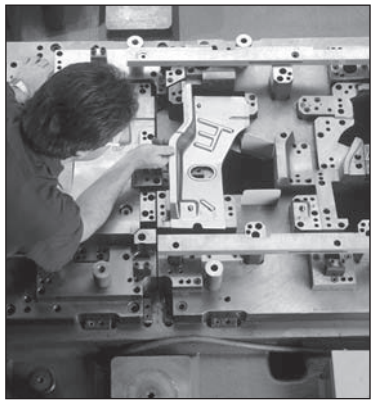
7. Investigue el papel de la difusión en estado sólido en la fabricación de componentes cerámicos utilizando el proceso de metalurgia de polvos.

CAPÍTULO

6 Propiedades mecánicas de metales I



(© AP/Wide World Photos)



(© Roger Ball/Corbis)

Los metales se elaboran en formas funcionales aplicando una amplia gama de operaciones de conformado de metal, tanto en frío como en caliente. Uno de los ejemplos más importantes que revela la aplicación de operaciones de conformado de metal, es la fabricación de piezas automotrices (tanto de carrocería como de motor). El bloque del motor se fabrica de hierro fundido o aleaciones de aluminio; el cilindro y otras aberturas del bloque se fabrican mediante operaciones de perforación, barrenado y taladrado; las cabezas de cilindro también son fundiciones de aleaciones de aluminio; los pernos de conexión, manivelas y levas se forjan (en ocasiones se cuelan) y luego se rectifican con muela; los paneles de la carrocería, incluso el techo, el capó, las puertas y los paneles laterales se troquelan a partir de láminas de acero y luego se unen mediante soldadura por puntos (figura de la izquierda). A medida que aumenta el número de operaciones para producir una pieza, ocurre lo mismo con su costo y, por consiguiente, con todo el producto. Para reducir el costo, los fabricantes aplican los conceptos de la fabricación "cerca de la forma neta", con los que el producto se forma con el menor número de operaciones y la menor cantidad necesaria de maquinado de acabado o rectificación con muela. Las piezas automotrices con formas complejas y no simétricas, como los engranajes biselados o las juntas universales, se forjan casi listas para instalarse (figura de la derecha). ■

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Describir las operaciones de conformado que se usan para dar forma funcional a metales. Diferenciar entre aleaciones forjadas y productos fundidos. Diferenciar los productos aleados de forja de los productos de fundición.
2. Describir la conducta constitutiva de metales en términos de la ingeniería y de la definición verdadera de tensión de ingeniería y de deformación convencional.
3. Explicar las diferencias entre deformación elástica y deformación plástica a escala atómica, microscópica y macroscópica.
4. Explicar las diferencias entre tensión de cizalladura y deformación de cizalladura y las tensiones y deformaciones normales.
5. Explicar qué es el ensayo de tracción, qué tipo de máquina se emplea para realizar los ensayos de tracción y qué información respecto a las propiedades de un material pueden obtenerse de estos ensayos.
6. Definir dureza y explicar cómo se mide. Describir diversas escalas de dureza disponibles.
7. Describir la deformación plástica de un monocristal a escala atómica. Describir el concepto de un deslizamiento, dislocaciones, maclas y su papel en la deformación de un monocristal.
8. Definir sistemas de deslizamiento críticos en monocristales BCC, FCC y HCP.
9. Describir la ley de Schmid y su aplicación en la determinación de la tensión de cizalladura crítica.
10. Describir el efecto del proceso de deformación plástica en las propiedades y la estructura de grano de materiales policristalinos.
11. Explicar el efecto del tamaño de grano (ecuación de Hall-Petch) y los límites de grano sobre la deformación plástica y las propiedades de un metal.
12. Describir varios de los mecanismos que se emplean para el endurecimiento de metales.
13. Describir el proceso de recocido y su efecto en las propiedades y microestructura de un metal trabajado en frío.
14. Describir la conducta superplástica en metales.
15. Describir un metal nanocristalino y sus ventajas.

En este capítulo se examinan primero algunos de los métodos básicos para procesar metales y aleaciones en formas útiles. Se define tensión y deformación en metales y se describe el ensayo de tracción utilizado para determinar estas propiedades. Se continúa con un estudio de la dureza y del ensayo de dureza en metales. Después se examina la deformación plástica de un monocristal metálico y de metales policristalinos. Finalmente, se estudia el endurecimiento por disolución sólida de metales.

6.1 EL PROCESO DE METALES Y ALEACIONES

6.1.1 La fundición de metales y aleaciones

En su mayoría, los metales se procesan primero fundiendo el metal en un horno que actúa como depósito del metal fundido. A este metal fundido pueden añadirse los elementos de aleación necesarios para producir las distintas aleaciones. Por ejemplo, el metal

magnesio en estado sólido puede añadirse al aluminio fundido y, después de su fusión, puede ser mezclado mecánicamente con el aluminio hasta producir un líquido homogéneo de una aleación aluminio-magnesio. Después de eliminar las impurezas de óxido de la aleación Al-Mg fundida y el indeseado gas hidrógeno, se cuela en el molde de una máquina de colada semicontinua con enfriamiento directo, como la que se muestra en la figura 4.8. De este modo, se producen enormes lingotes en forma de plancha como el que se muestra en la figura 4.1. Otros tipos de lingotes con distinta sección se cuelan de forma similar; por ejemplo, los lingotes para extrusión se cuelan con sección circular.

Los productos semiacabados se fabrican con lingotes de forma elemental. Las chapas[1] y las placas[2] se producen por laminación de lingotes en forma de plancha para reducir su espesor (figura 6.1). Las formas extrudidas, como canales y perfiles es-

[1] En este libro se define *chapa* como un producto de corte en forma rectangular de entre 0.006 a 0.249 pulg (0.015 a 0.063 cm) de espesor.
[2] En este libro se define *placa* como un producto de corte y forma rectangular de 0.250 pulg (0.653 cm) de espesor o más.

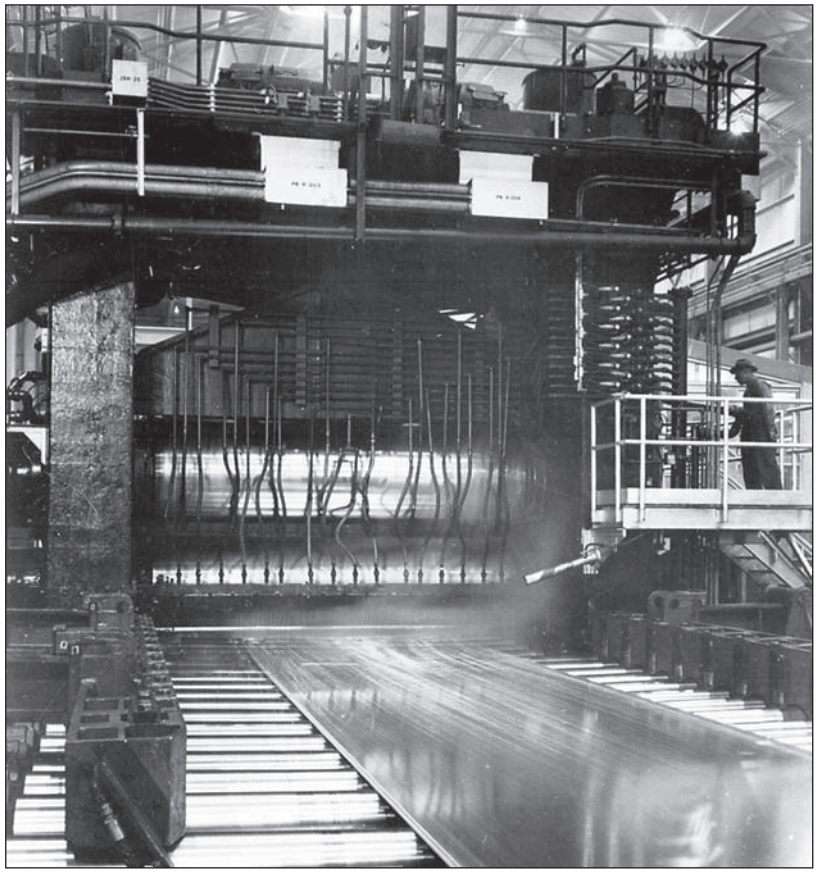


Figura 6.1
Laminador de grandes dimensiones con cuatro rodillos laminando una plancha de una aleación de aluminio que con el tiempo será reducida hasta producir una chapa de aluminio. *(Cortesía de Reynolds Metals Co.)*

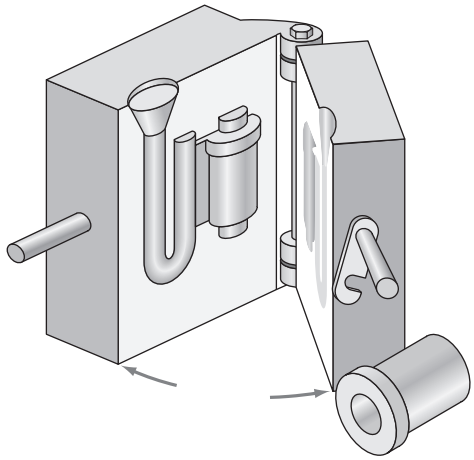


Figura 6.2
Molde permanente o coquilla para fundición. En la mitad izquierda del molde se muestra la colada solidificada con la entrada y el núcleo de metal. El producto acabado se muestra delante del molde.
(Según H. F. Taylor, M. C. Flemings y J. Wulff, "Foundry Engineering", Wiley, 1959, p. 58.)

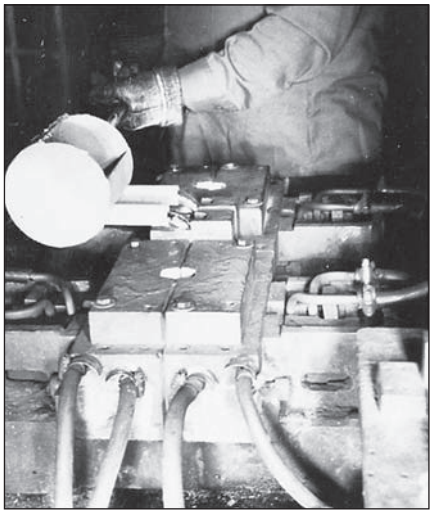
tructurales, se producen con tochos para extrusión y las barras y alambre se fabrican de lingotes de sección circular. Todos estos productos, fabricados mediante trabajo del metal en caliente o en frío a partir de lingotes de gran dimensión, se denominan *productos aleados de forja*. Los efectos de la deformación permanente sobre la estructura y propiedades de los metales serán tratados en las secciones 6.5 y 6.6.

En una escala más pequeña, el metal fundido puede ser introducido en un molde con la forma del producto final, y normalmente sólo se requiere un pequeño mecanizado o alguna operación de acabado para producir el producto final. Los productos hechos de este modo se denominan *productos de fundición* y las aleaciones usadas para producirlos, *aleaciones para fundición*. Por ejemplo, los pistones utilizados en motores de automóvil usualmente se fabrican por colada del metal líquido en un molde permanente o coquilla hecha de acero. En la figura 6.2 se muestra el esquema de un molde permanente que contiene una pieza colada. En la figura 6.3*a* se muestra a un operario colando una aleación de aluminio en un molde permanente para fabricar un par de pistones por colada; en la figura 6.3*b* se muestran las piezas coladas después de retirarlas del molde. Después de eliminar las rebabas del tratamiento térmico y del mecanizado, el pistón acabado (figura 6.3*c*) está listo para el montaje en un motor de automóvil.

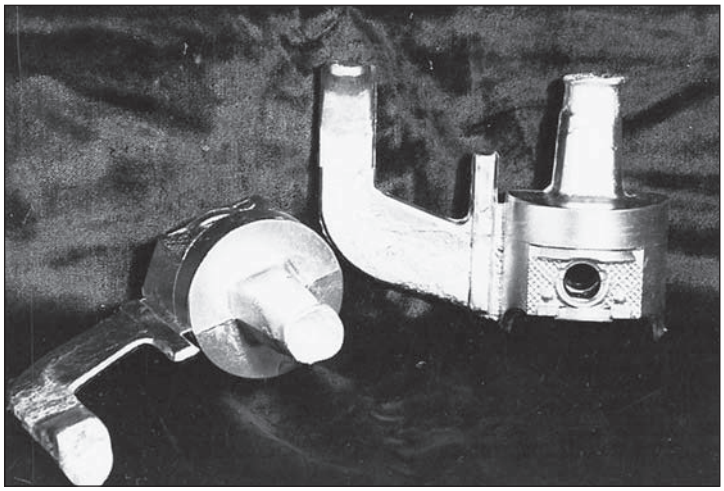
6.1.2 Laminación en caliente y en frío de metales y aleaciones

La laminación en caliente y la laminación en frío son métodos que se usan comúnmente en la fabricación de metales y aleaciones. Mediante estos métodos se pueden producir chapas y placas de gran longitud y con secciones transversales uniformes.

Laminación en caliente de lingotes de sección rectangular La **laminación en caliente** de los lingotes de sección rectangular o planchón, primero se lleva a cabo en ca-



a)



b)

c)

Figura 6.3
a) Coquilla para la fundición simultánea de dos pistones de aleación de aluminio. *b*) Coladas con los pistones de aleación de aluminio después de retirarlos de la coquilla mostrada en *a*). *c*) Pistón de automóvil después del tratamiento térmico y mecanizado listo para su montaje en un motor.
(Cortesía de General Motors Corporation.)

liente porque, cuando el metal está caliente, es posible una mayor reducción del espesor a cada pasada por el laminador. Antes de la laminación en caliente, los planchones se precalientan a alta temperatura (alrededor de 1 200°C). Aunque algunas veces es posible laminar en caliente directamente los planchones que salen de la máquina de colada (figura 6.4). Después de extraer los lingotes del horno de precalentamiento, se laminan en caliente en un tren de laminación de desbaste reversible (figura 6.5).

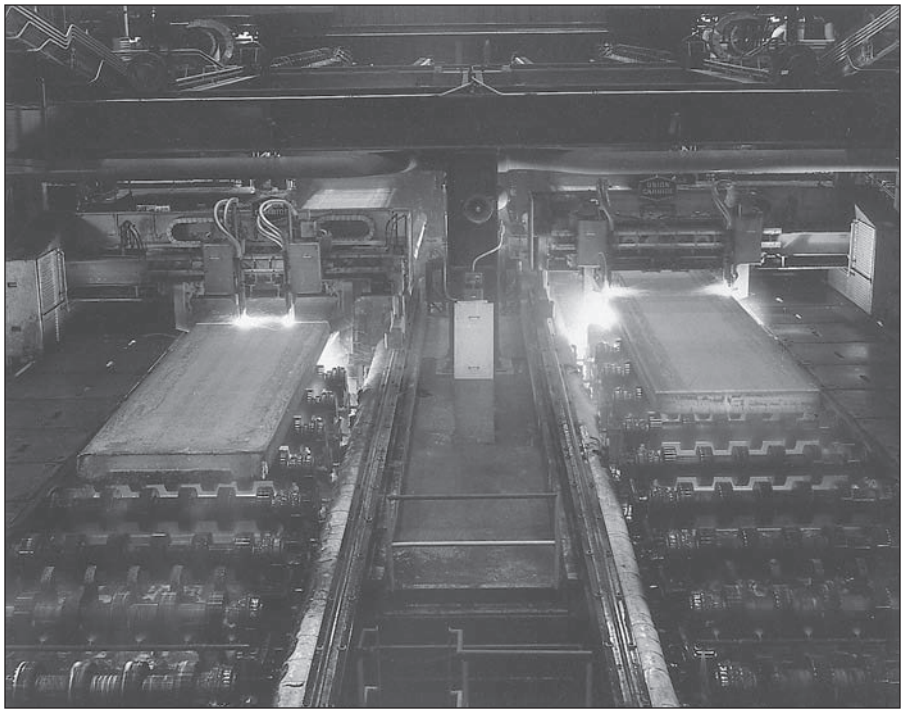


Figura 6.4
Los planchones perfectamente conformados se cortan a la longitud requerida mediante una llamada de oxicorte en la misma máquina de colada continua de la planta de Bethlehem Steel Co, en Burns Harbor, Indiana. Las dos líneas de colada producen 300 toneladas de planchones cada 45 minutos.
(Cortesía de Bethlehem Steel Co.)

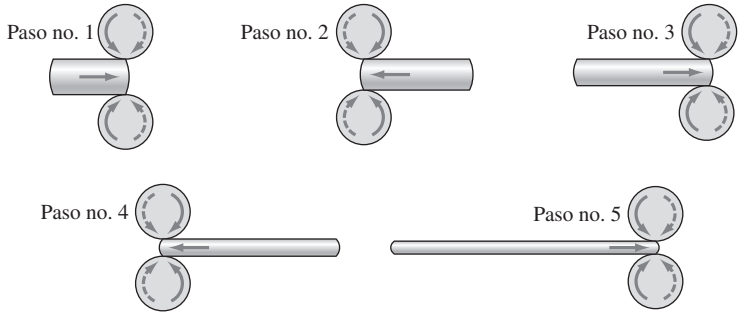


Figura 6.5
Diagrama de la secuencia de las operaciones de laminación en caliente necesarias para reducir un lingote a planchón en un laminador reversible de dos rodillos.
(Según H. E. McGannon [ed.], "The Making, Shaping, and Treating of Steel", 9a. ed., United States Steel, 1971, p. 677.)

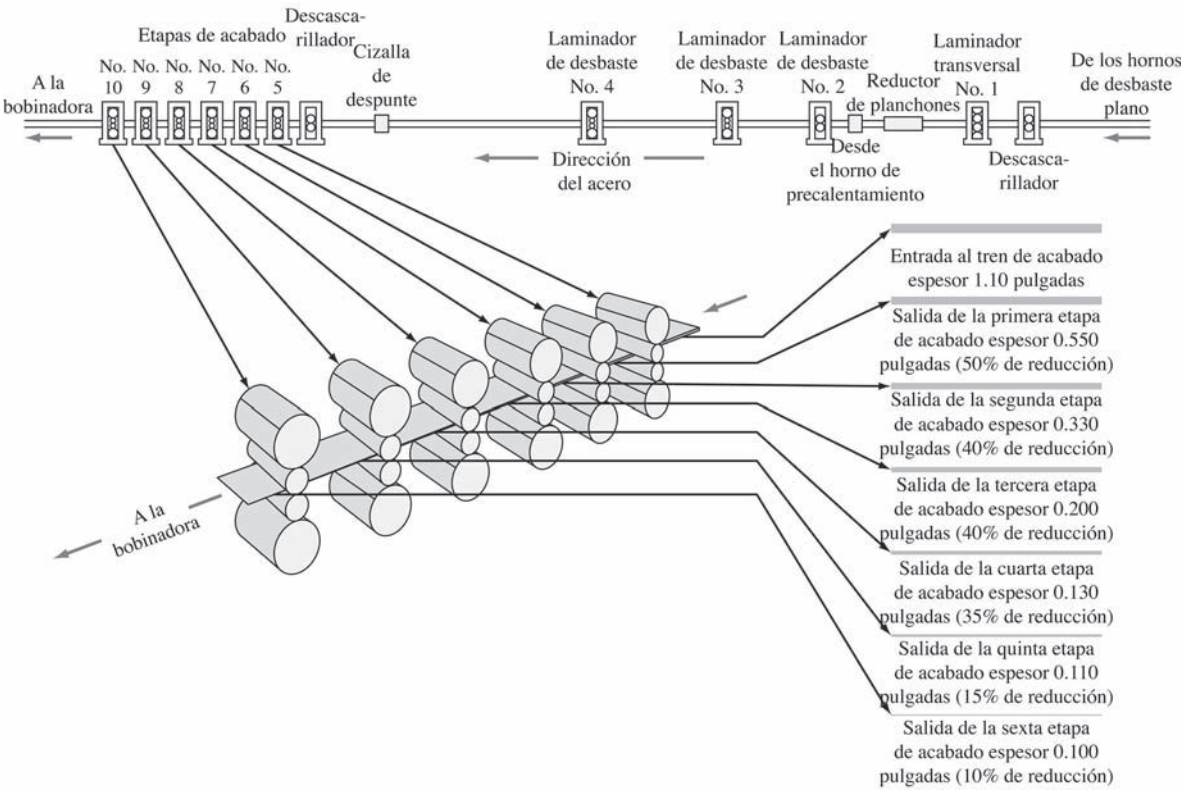


Figura 6.6
Típica reducción por pasos en las etapas de acabado de un tren de laminación en caliente de banda equipado con cuatro laminadores de desbaste y seis de acabado. El dibujo no está a escala.
(Según H. E. McGannon [ed.], "The Making, Shaping, and Treating of Steel", 9a. ed., United States Steel, 1971, p. 937.)

La laminación continúa hasta que la temperatura del planchón baja tanto que es demasiado difícil seguir laminando. Entonces, el planchón se recalienta y la laminación en caliente continúa hasta que la banda obtenida es suficientemente delgada para enrollarla en forma de bobina. En operaciones a gran escala, la laminación en caliente del planchón se lleva a cabo en un conjunto de laminadores de cuatro rodillos utilizados individualmente o en serie como se muestra en la figura 6.6, que corresponde a la laminación en caliente de banda de acero.

Laminación en frío de chapas metálicas[3] Después de la laminación en caliente, que también puede incluir una cierta **laminación en frío**, a las bobinas de metal se les aplica un tratamiento térmico denominado **recocido**, para reblandecer el metal y eliminar cualquier trabajo en frío introducido durante el proceso de laminación en caliente. La laminación en frío, que normalmente se aplica a temperatura ambiente, también se lleva a cabo en laminadores de cuatro rodillos utilizados solos o en serie (figura 6.7). En la figura 6.8 se muestra una chapa de acero laminada en frío en un laminador industrial.

[3]La laminación en frío de metales usualmente se lleva a cabo a temperaturas inferiores a la temperatura de recristalización del metal y produce un endurecimiento por deformación del mismo.

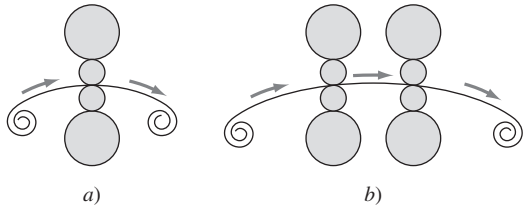


Figura 6.7
Diagrama esquemático que señala el camino del metal durante la laminación en frío de una chapa de metal en un tren de laminación de cuatro rodillos: *a*) laminador simple y *b*) dos laminadores en serie.

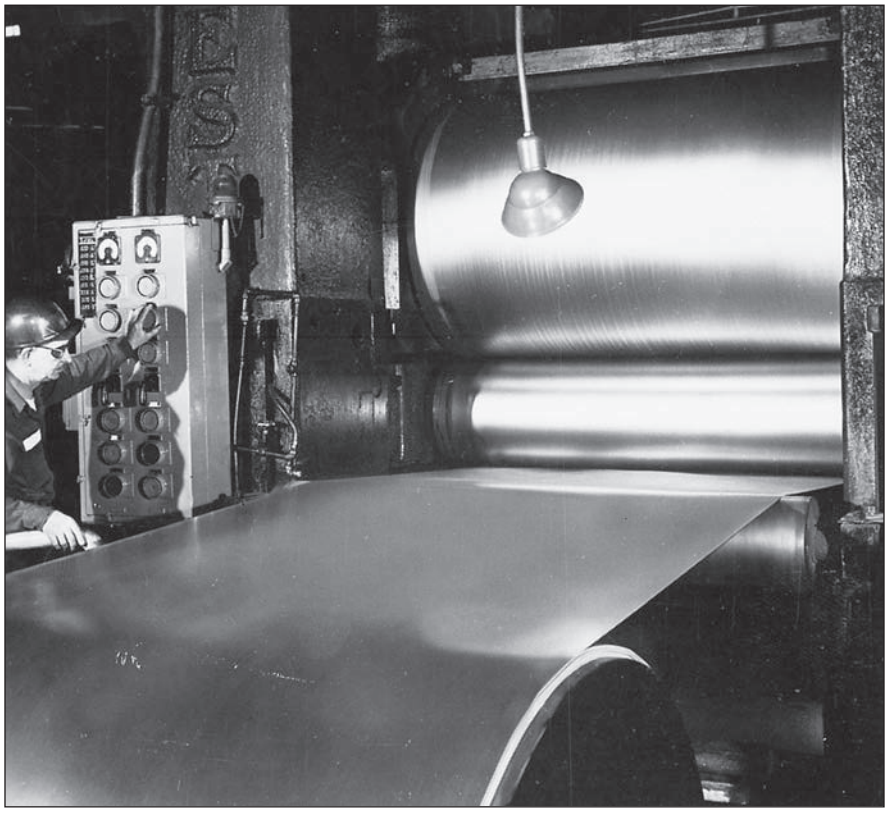


Figura 6.8
Chapa de acero laminada en frío. Este tipo de laminadores se utiliza en la laminación en frío de bandas de acero, hojalata y metales no ferrosos.
(Cortesía de Bethlehem Steel Co.)

El **porcentaje de reducción en frío** de una plancha o chapa de metal se puede calcular como:

$$\%\ \text{reducción en frío} = \frac{\text{espesor inicial del metal} - \text{espesor final del metal}}{\text{espesor inicial del metal}} \times 100\% \tag{6.1}$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 6.1

Calcule el porcentaje de reducción durante una laminación en frío de una chapa de una aleación de aluminio de 0.120 a 0.040 pulgadas.

■ **Solución**

$$\%\ \text{reducción en frío} = \frac{\text{espesor inicial} - \text{espesor final}}{\text{espesor inicial}} \times 100\%$$

$$= \frac{0.120\ \text{pulg} - 0.040\ \text{pulg}}{0.120\ \text{pulg}} \times 100\% = \frac{0.080\ \text{pulg}}{0.120\ \text{pulg}} \times 100\%$$

$$= 66.7\%$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 6.2

Una chapa de una aleación 70% Cu-30% Zn ha sido laminada 20 por ciento hasta 3.00 mm. La chapa se lamina otra vez en frío hasta 2.00 mm. ¿Cuál es el porcentaje de trabajo en frío total?

■ **Solución**

Primero se determina el espesor inicial de la chapa considerando la primera reducción de 20 por ciento. Sea x igual al espesor inicial de la chapa. Entonces,

$$\frac{x - 3.00\ \text{mm}}{x} = 0.20$$

o

$$x - 3.00\ \text{mm} = 0.20x$$

$$x = 3.75\ \text{mm}$$

Enseguida se determina el porcentaje *total* del trabajo en frío, desde el espesor inicial hasta el espesor final, mediante la relación:

$$\frac{3.75\ \text{mm} - 2.00\ \text{mm}}{3.75\ \text{mm}} = \frac{1.75\ \text{mm}}{3.75\ \text{mm}} = 0.466\ \text{o}\ 46.6\%$$

6.1.3 Extrusión de metales y aleaciones

La **extrusión** es un proceso de conformado plástico mediante el cual un material sometido a alta presión reduce su corte transversal cuando es forzado a pasar a través de una abertura o matriz de extrusión (figura 6.9). Para muchos metales, el proceso de extrusión se utiliza para producir barras cilíndricas o tubos. En los materiales con mayor facilidad para la extrusión como aluminio, cobre y algunas de sus aleaciones, también

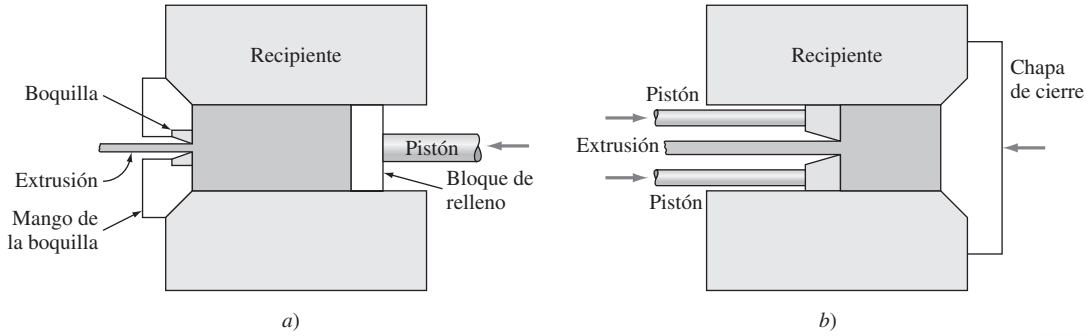


Figura 6.9
Procesos básicos de extrusión en metales: *a*) directo y *b*) indirecto.
(Según G. Dieter, "Mechanical Metallurgy", 2a. ed., McGraw-Hill, 1976, p. 639.)

Animación

es usual producir formas con corte transversal irregular. La mayoría de los metales se extruye en caliente porque la resistencia de la formación del metal es menor a que si lo fuera en frío. Durante la extrusión, el tocho de metal introducido en el contenedor de la prensa de extrusión es forzado por el pistón de la máquina a pasar a través de la matriz, de tal modo que el metal es continuamente deformado para producir un perfil de gran longitud con el corte transversal deseado.

Los dos principales procesos son la *extrusión directa* y *extrusión indirecta*. En la extrusión directa, el tocho de metal se coloca en el interior del contenedor de la prensa de extrusión y es forzado por el pistón a pasar a través de la matriz (figura 6.9*a*). En la extrusión indirecta, un pistón hueco empuja la matriz hacia el otro extremo del contenedor de la prensa de extrusión que está cerrado mediante una placa (figura 6.9*b*). Las fuerzas de fricción y la potencia necesarias en la extrusión indirecta son menores que en la extrusión directa. Sin embargo, la fuerza que puede aplicarse utilizando un pistón hueco en el proceso indirecto está mucho más limitada que la que puede utilizarse en la extrusión directa.

El proceso de la extrusión se utiliza principalmente para producir barras, tubos y formas irregulares de metales no ferrosos de bajo punto de fusión tales como aluminio, cobre y sus aleaciones. No obstante, con el desarrollo de prensas de extrusión de gran potencia y la optimización de lubricantes tales como el vidrio, algunos aceros al carbono y aceros inoxidables también se pueden extrudir en caliente.

6.1.4 Forja

La **forja** es otro método primario de conformado de metales en formas útiles. En el proceso de forja, el metal es golpeado o comprimido hasta la forma deseada. Muchas operaciones de forja se llevan a cabo con el metal caliente, aunque en algunas ocasiones el metal puede forjarse en frío. Hay dos tipos principales de forja: *con martillo* y *con prensa*. En la forja con martillo, el martillo de la prensa golpea repetidamente contra la superficie de metal. En la forja con prensa, el metal está sujeto a una fuerza comprensiva que cambia lentamente (figura 6.10).

Los procesos de forja también pueden clasificarse como *forja en matriz abierta* y *forja en matriz cerrada*. La forja en matriz abierta se lleva a cabo entre dos matrices planas o de forma muy simple, como cavidades semicirculares o en forma de v (figu-

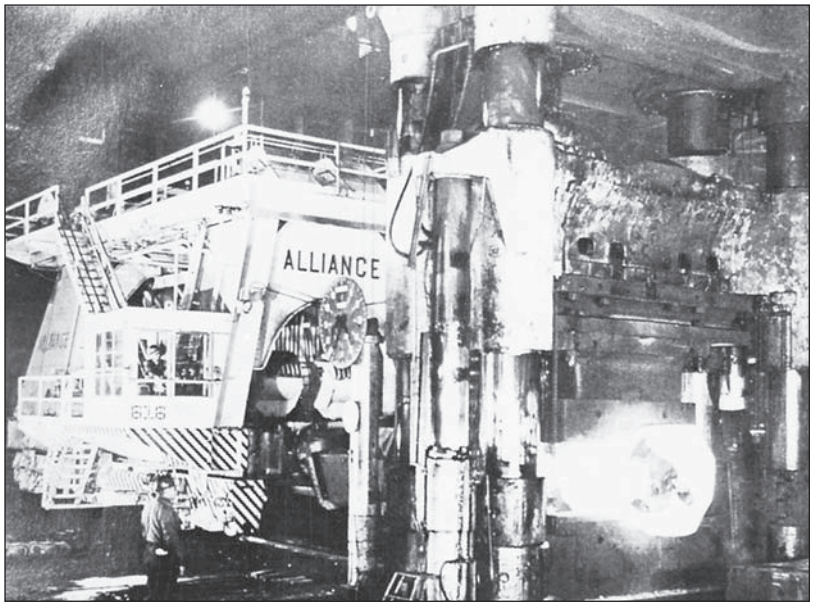


Figura 6.10
Manipulador manteniendo un lingote en la posición adecuada mientras una prensa de 10 000 toneladas comprime el acero caliente hasta la forma del producto final.
(Según H. E. McGannon [ed.], "The Making Shaping, and Treating of Steel", 9a. ed., United States Steel Corporation, 1971, p. 1044.)

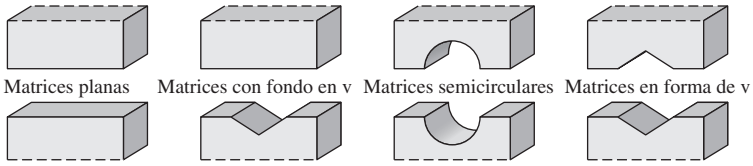


Figura 6.11
Formas básicas de matrices abiertas.
(Según H. E. McGannon [ed.], "The Making Shaping, and Treating of Steel", 9a. ed., United States Steel Corporation, 1971, p. 1045.)

ra 6.11), y es particularmente útil para producir grandes piezas de acero para turbinas de vapor y generadores. En la forja con matriz cerrada, el metal se coloca entre las dos partes de la matriz, una con la forma de la parte superior de la pieza que se desea obtener y otra con la parte inferior, y puede llevarse a cabo utilizando una sola matriz o un conjunto de matrices. A modo de ejemplo, las bielas utilizadas en motores de automóvil se fabrican utilizando un conjunto de matrices cerradas (figura 6.12).

En general, el proceso de forja se utiliza para producir formas irregulares que requieren trabajo adicional para mejorar la estructura del metal al reducir la porosidad y refinar la estructura interna. Por ejemplo una llave que ha sido forjada será más

Figura 6.12
Conjunto de matrices cerradas utilizado en la producción de bielas de automóvil. *(Cortesía de Forging Industry Association.)*

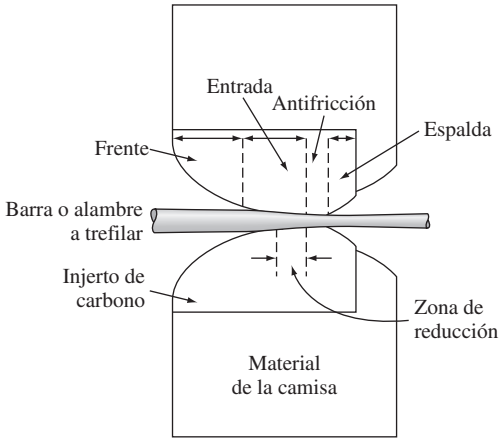


Figura 6.13
Sección de una matriz para trefilar. *(Según "Wire and Rods, Alloy Steel", Steel Products Manual, American Iron and Steel Institute, 1975.)*

resistente y tendrá menos posibilidades de romperse que aquella que únicamente se funde y vacía en moldes. Algunas veces se utiliza la forja para romper la estructura de colada presente en metales muy aleados (ejemplo, algunos aceros de herramientas) de modo que el metal final sea más homogéneo y más resistente a fracturas durante el trabajo subsiguiente.

6.1.5 Otros procesos de conformado de metales

Existen otros procesos secundarios de conformado de metales, pero no se estudian en este libro. No obstante, dos de ellos se describen brevemente, el *trefilado de alambre* y la *embutición de chapas metálicas*.

El **trefilado de alambre** es un proceso de conformado importante. En este caso, se reduce el diámetro de una barra o alambre inicial durante su paso a través de una o más matrices de prefijar (figura 6.13). En el trefilado de alambre de acero se utiliza un injerto de carburo de volframio insertado en una camisa de acero. El carburo aporta la resistencia al desgaste necesaria para la reducción del alambre de acero, pero es necesario asegurar que la superficie de la barra o alambre de acero de la barra, o alambre inicial esté limpia y adecuadamente lubricada. Si el alambre endurece durante el procesado suele aplicarse un tratamiento térmico intermedio de reblandecimiento. Los procedimientos empleados varían considerablemente dependiendo del metal o aleación a trefilar, del diámetro final y propiedades mecánicas deseadas.

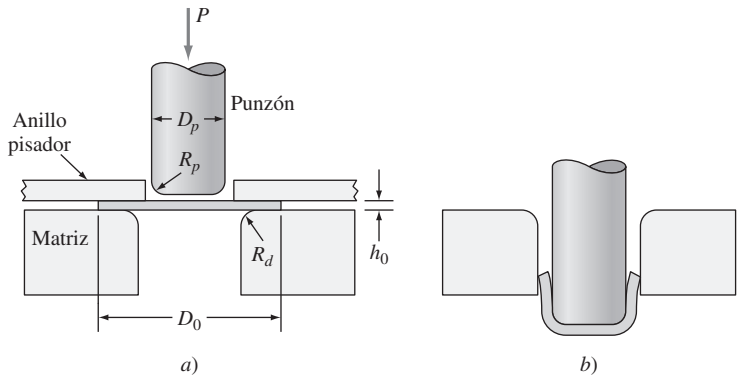


Figura 6.14
Embutición profunda de un vaso cilíndrico *a*) antes de la embutición y *b*) después de la embutición.
(Según G. Dieter, "Mechanical Metallurgy", 2a. ed., McGraw-Hill, 1976, p. 688.)

PROBLEMA DE EJEMPLO 6.3

Calcule el porcentaje de reducción en frío cuando una varilla de cobre recocido es trefilada desde un diámetro de 1.27 mm (0.050 pulgadas) a un diámetro de 0.813 mm (0.032 pulgadas).

■ **Solución**

$$\%\ \text{reducción en frío} = \frac{\text{cambio en el área de la sección transversal}}{\text{área original}} \times 100\%$$

$$= \frac{(\pi/4)(1.27\ \text{mm})^2 - (\pi/4)(0.813\ \text{mm})^2}{(\pi/4)(1.27\ \text{mm})^2} \times 100\% \qquad \textbf{(6.2)}$$

$$= \left[1 - \frac{(0.813)^2}{(1.27)^2}\right](100\%)$$

$$= (1 - 0.41)(100\%) = 59\% \blacktriangleleft$$

La *embutición profunda* es otro proceso de conformado metálico y se utiliza para fabricar artículos con forma de copa a partir de chapas de metal. La chapa de metal se coloca sobre una matriz con la forma adecuada y es presionada hacia el interior de la matriz por un punzón (figura 6.14). Normalmente, se utiliza un anillo pisador para poder presionar el metal hacia el interior de la matriz sin que se arrugue o desgarre.

6.2 TENSIÓN Y DEFORMACIÓN EN METALES

En la primera sección de este capítulo se ha examinado brevemente la mayoría de los principales métodos de procesado de metales para obtener productos semiacabados por forja o por fundición. Ahora se mostrará cómo se evalúan las propiedades mecánicas de resistencia y ductilidad para aplicaciones en ingeniería.

6.2.1 Deformación elástica y plástica

Laboratorio virtual

Cuando se somete una pieza de metal a una fuerza de tracción uniaxial se produce la deformación del metal. Si el metal recupera sus dimensiones originales cuando se elimina la fuerza, se considera que el metal ha sufrido una **deformación elástica**. La cantidad de deformación elástica que puede soportar un metal es pequeña pues durante la deformación elástica, los átomos del metal se desplazan de sus posiciones originales, pero sin llegar a alcanzar nuevas posiciones. De este modo, cuando la fuerza sobre el metal deformado elásticamente se elimina, los átomos del metal vuelven a sus posiciones iniciales y el metal recupera su forma inicial. Si el metal se deforma tanto que no puede recuperar completamente sus dimensiones originales, se considera que ha sufrido una *deformación plástica*. Durante la deformación plástica, los átomos del metal se desplazan *continuamente* desde sus posiciones iniciales hasta otras nuevas. La propiedad que tienen algunos metales de ser extensamente deformados sin que se fracturen, es una de las más útiles en ingeniería. Por ejemplo, la gran deformación plástica a que puede ser sometido el acero permite fabricar parachoques, capós y puertas de automóvil sin que se fracture el metal.

6.2.2 Tensión de ingeniería y deformación convencional

Tensión de ingeniería Considérese una barra cilíndrica de longitud l_0 y área de la sección transversal A_0 sujeta a una fuerza de tracción uniaxial F, como la que se muestra en la figura 6.15. Por definición, la **tensión de ingeniería** σ sobre la barra es igual

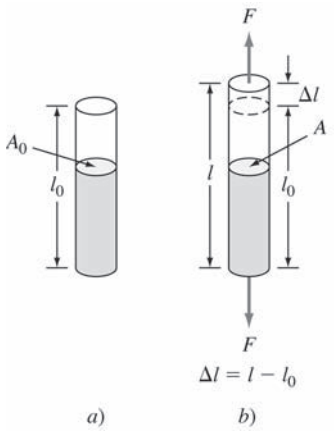


Figura 6.15
Alargamiento de una barra cilíndrica de metal sujeta a una fuerza de tracción uniaxial *F*. *a*) La barra sin ninguna fuerza y *b*) la barra sujeta a la fuerza de tracción uniaxial *F*, que alarga la barra desde una longitud l_0 hasta *l*.

a la fuerza media de fracción F sobre la barra dividida por el área de su sección transversal A_0. Por tanto,

$$\text{Tensión convencional } \sigma = \frac{F \text{ (fuerza media de tracción uniaxial)}}{A_0 \text{ (área de la sección transversal original)}} \quad \textbf{(6.3)}$$

Las unidades de la tensión convencional son:

Sistema anglosajón: libras fuerzas por pulgada cuadrada ($lb_f/pulg^2$, o psi);
lb_f = libras fuerza
SI: newtons por metro cuadrado (N/m^2) o pascales (Pa), donde $1\ N/m^2 = 1\ Pa$

Los factores de conversión desde psi a pascal son

$$1 \text{ psi} = 6.89 \times 10^3 \text{ Pa}$$
$$10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ megapascal} = 1 \text{ MPa}$$
$$1\,000 \text{ psi} = 1 \text{ ksi} = 6.89 \text{ MPa}$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 6.4

Una barra de aluminio de 0.500 pulgadas de diámetro está sometida a una fuerza de 2 500 lb_f. Calcule la tensión convencional que actúa en la barra en libras por pulgada cuadrada (psi).

■ Solución

$$\sigma = \frac{\text{fuerza}}{\text{área de la sección transversal}} = \frac{F}{A_0}$$
$$= \frac{2\,500 \text{ lb}_f}{(\pi/4)(0.500 \text{ pulg})^2} = 12\,700 \text{ lb}_f/\text{pulg}^2 \blacktriangleleft$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 6.5

Una barra de 125 cm de diámetro está sujeta a un peso de 2 500 kg. Calcule la tensión convencional que actúa en la barra en megapascales (MPa).

■ Solución

El peso que actúa sobre la barra tiene una masa de 2 500 kg. En unidades de SI la fuerza sobre la barra es igual a la masa del peso por la aceleración de gravedad (9.81 m/s^2), o

$$F = ma = (2\,500 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2) = 24\,500 \text{ N}$$

El diámetro d de la barra = 1.25 cm = 0.0125 m. Por tanto, la tensión convencional en la barra es

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{(\pi/4)(d^2)} = \frac{24\,500 \text{ N}}{(\pi/4)(0.0125 \text{ m})^2}$$
$$= (2.00 \times 10^8 \text{ Pa})\left(\frac{1 \text{ MPa}}{10^6 \text{ Pa}}\right) = 200 \text{ MPa} \blacktriangleleft$$

Deformación convencional Cuando una fuerza de tracción uniaxial se aplica a una barra, como la que se muestra en la figura 6.15, se produce un alargamiento de la barra en la dirección de la fuerza. Dicho desplazamiento se conoce como *deformación*. Por definición, **deformación convencional** es la relación entre el cambio en la longitud de una muestra en la dirección en que se aplica la fuerza y la longitud original de la muestra considerada. Por tanto, la deformación convencional para la barra de metal que se muestra en la figura 6.15 (o para una muestra similar de metal) es

$$\text{Deformación convencional } \epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l \text{ (cambio de la longitud de la muestra)}}{l_0 \text{ (longitud original de la muestra)}} \quad \textbf{(6.4)}$$

donde l_0 = longitud inicial de la muestra y l = longitud después de ser alargada por la fuerza uniaxial a tracción. En muchos casos, la deformación convencional se determina sobre una pequeña longitud llamada *longitud* entre marcas, normalmente 2 pulgadas, de una muestra mucho mayor, de 8 pulgadas, por ejemplo (véase problema de ejemplo 6.6).

Laboratorio virtual

Las *unidades de la formación convencional* ϵ son:

Sistema anglosajón: pulgadas por pulgada (pulg/pulg)

SI: metros por metro (m/m)

Así, la deformación convencional es una *magnitud adimensional*. En la práctica industrial es frecuente convertir la deformación convencional en *porcentaje de deformación* o *porcentaje de alargamiento*:

$$\%\text{ deformación} = \text{deformación convencional} \times 100\% = \%\text{ alargamiento}$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 6.6

Una probeta de aluminio comercialmente puro de 0.500 pulgadas de ancho, 0.040 pulgadas de espesor, y 8 pulgadas de longitud con dos marcas de ensayo realizadas en el centro de la probeta y separadas entre sí 2.00 pulgadas, es deformada hasta que las marcas se han separado 2.65 pulgadas (figura 6.16). Calcule la deformación convencional y el porcentaje de alargamiento que ha sufrido la muestra.

■ **Solución**

$$\text{Deformación convencional } \epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{2.65 \text{ pulg} - 2.00 \text{ pulg}}{2.00 \text{ pulg}} = \frac{0.65 \text{ pulg}}{2.00 \text{ pulg}} = 0.325 \blacktriangleleft$$

$$\%\text{ alargamiento} = 0.325 \times 100\% = 32.5\% \blacktriangleleft$$

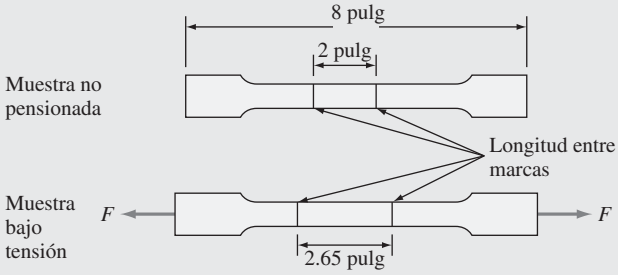


Figura 6.16
Probeta plana antes y después del ensayo.

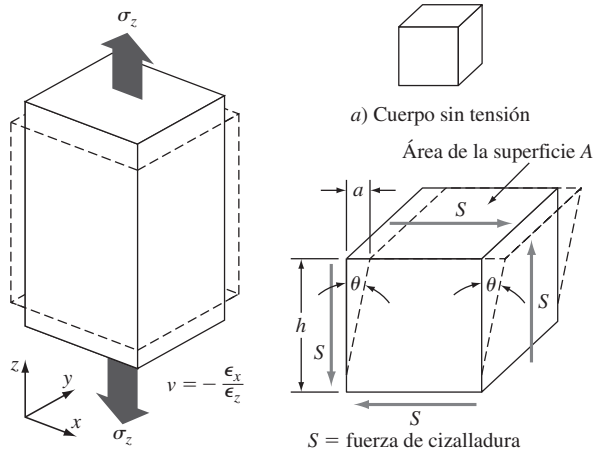


Figura 6.17
a) Cuerpo de forma cúbica sin tensión. *b*) Cuerpo de forma cúbica sometido a tensión de tracción. Se denomina coeficiente de Poisson v a la relación entre la contracción elástica perpendicular y la extensión elástica longitudinal. *c*) Cuerpo de forma cúbica sometido a una fuerza S de cizalladura que actúa sobre la superficie A. La tensión de cizalladura τ que actúa sobre el cuerpo es igual a S/A.

6.2.3 Coeficiente de Poisson

La deformación longitudinal elástica de un metal produce un cambio simultáneo de las dimensiones laterales. Como se muestra en la figura 6.17*b*, una tensión a tracción o σ_z produce una deformación axial $+\epsilon_z$ y una contracción lateral de $-\epsilon_x$ y $-\epsilon_y$. Si la conducta es isotrópica,[4] ϵ_x y ϵ_y son iguales. La relación

$$\nu = -\frac{\epsilon \text{ (lateral)}}{\epsilon \text{ (longitudinal)}} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \qquad \textbf{(6.5)}$$

se denomina *coeficiente de Poisson*. Para materiales ideales, $\nu = 0.5$. No obstante, en materiales reales el coeficiente de Poisson oscila entre 0.25 y 0.4, con un valor medio alrededor de 0.3. En la tabla 6.1 se representan los valores de ν de algunos metales y aleaciones.

6.2.4 Tensión de cizalladura y deformación de cizalladura

Hasta ahora se ha discutido la formación elástica y plástica de metales y aleaciones bajo **tensiones de tracción** uniaxiales. Otro método importante de deformación de metales está relacionado con la acción de tensiones de cizalladura. En la figura 6.17*c*,

[4] *Isotrópico*: que presenta propiedades con el mismo valor aunque sean medidas en cualquier dirección.

Tabla 6.1 Valores típicos de constantes elásticas de materiales isotrópicos a temperatura ambiente

Material	Módulo de elasticidad, 10^{-6} psi (GPa)	Módulo de rigidez 10^{-6} psi (GPa)	Coeficiente de Poisson
Aleaciones de aluminio	10.5 (72.4)	4.0 (27.5)	0.31
Cobre	16.0 (110)	6.0 (41.4)	0.33
Acero (aceros al carbón y de baja aleación)	29.0 (200)	11.0 (75.8)	0.33
Aceros inoxidables (18-8)	28.0 (193)	9.5 (65.6)	0.28
Titanio	17.0 (117)	6.5 (44.8)	0.31
Volframio	58.0 (400)	22.8 (157)	0.27

Fuente: G. Dieter, "Mechanical Metallurgy", 3a. ed., McGraw-Hill, 1986.

se muestra la acción de un par de tensiones de cizalladura (las tensiones de la cizalladura siempre actúan a pares) sobre un cuerpo de forma cúbica, donde la fuerza de cizalla S actúa sobre el área A. La tensión de cizalladura τ se relaciona con la fuerza de cizalladura mediante la expresión

$$\tau \text{ (tensión de cizalladura)} = \frac{S \text{ (fuerza de cizalladura)}}{A \text{ (área sobre la que actúa la fuerza de cizalladura)}} \quad \textbf{(6.6)}$$

Las unidades para la tensión de cizalladura son las mismas que para la tensión de tracción uniaxial:

Sistema anglosajón: libras – fuerza por pulgada cuadrada ($lb_f/pulg^2$, o psi)

SI: newtons por metro cuadrado (N/m^2) o pascales (Pa)

La **formación de cizalladura** γ se define como la cantidad de desplazamiento de cizalladura a en la figura 5.17*c* dividido por la distancia h sobre la que se produce la cizalladura, o

$$\gamma = \frac{a}{h} = \tan \theta \quad \textbf{(6.7)}$$

Para cizalladura puramente elástica, la proporcionalidad entre la deformación a cizalladura y la tensión de cizalladura es

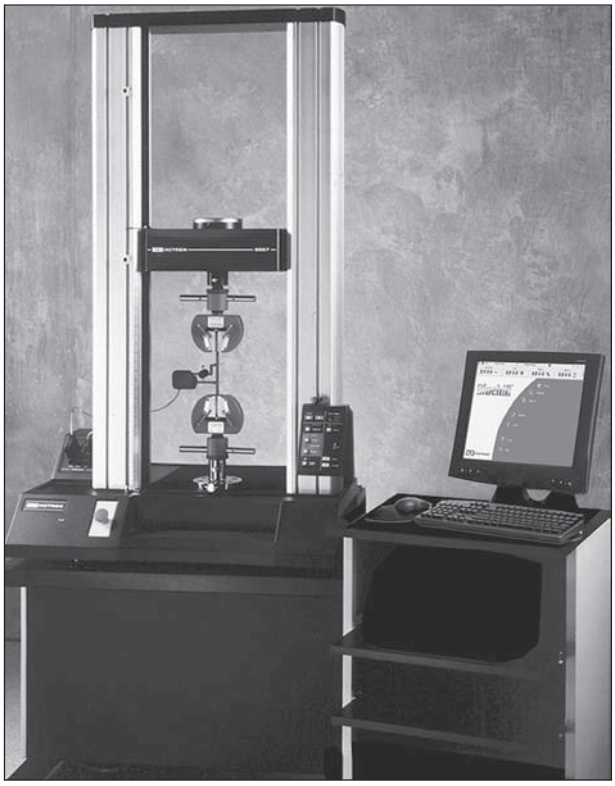
$$\tau = G\gamma \quad \textbf{(6.8)}$$

donde G es el módulo de rigidez.

Se tratará la tensión de cizalladura cuando se discuta la deformación plástica de metal en la sección 6.5.

6.3 EL ENSAYO DE TRACCIÓN Y EL DIAGRAMA TENSIÓN-DEFORMACIÓN CONVENCIONAL

El *ensayo de tracción* se utiliza para evaluar la resistencia de metales y aleaciones. En este ensayo, una muestra de metal se estira a velocidad constante hasta la fractura, que se produce en un tiempo relativamente corto. La figura 6.18 es una fotografía de una máquina moderna para ensayos de tracción y en la figura 6.19 se ilustra esquemáticamente cómo se realiza el ensayo a tracción.



Laboratorio virtual

Figura 6.18
Máquina para ensayos a tracción. La fuerza (carga) que actúa sobre la probeta se registra en un gráfico en el registrador de la izquierda de la fotografía. La deformación que sufre la muestra también se registra en el gráfico. La deformación producida se obtiene mediante un extensómetro sujeto directamente a la muestra.
(Cortesía de Instron® Corporation.)

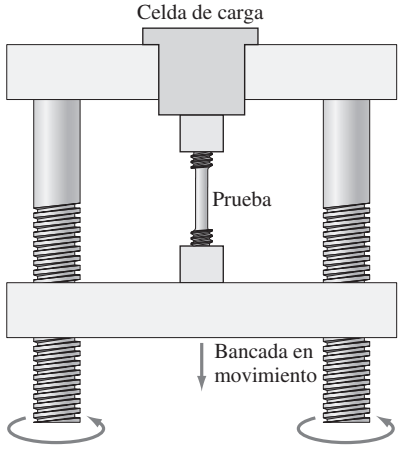


Figura 6.19
Ilustración esquemática que muestra cómo trabaja la máquina de ensayos de la figura 6.18. Nótese que la bancada superior de la máquina de ensayos de la figura 6.18 se desplaza hacia arriba.
(Según H. W. Hayden, W. G. Moffatt y John Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. 3: "Mechanical Behavoir", Wiley, 1965, figura 1.1, p. 2.)

La fuerza (carga) que actúa sobre la muestra sometida a ensayo se dibuja en el registrador mediante el desplazamiento del papel de registro, mientras que la deformación correspondiente se obtiene de la señal generada por un extensómetro extremo, sujeto a la muestra (figura 6.20) y también se dibuja en el papel de registro.

El tipo de probeta utilizado en los ensayos de tracción varía en forma considerable. En metales con sección transversal gruesa, como placas, normalmente se utilizan probetas de 0.50 pulgadas de diámetro (figura 6.21*a*). En metales de sección transversal más delgada, como chapas, se utilizan probetas planas (figura 6.21*b*). La probeta más utilizada en ensayos de tracción tiene una longitud entre marcas de 2 pulgadas.

Los valores de fuerza contenidos en el gráfico de la máquina de ensayo se pueden convertir en valores de tensión convencional y construir un diagrama tensión conven-

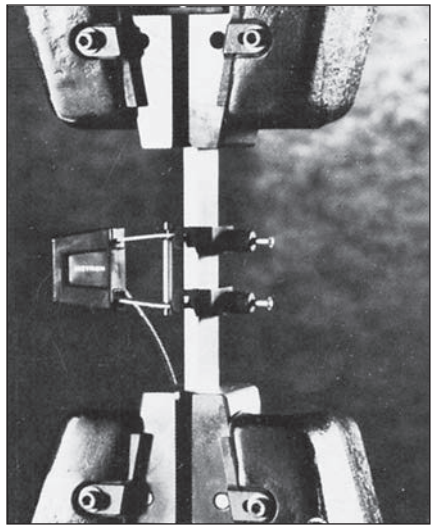


Figura 6.20
Primer plano del extensómetro de una máquina de ensayos que mide la deformación producida en la probeta durante el ensayo de tracción. El extensómetro está sujeto a la probeta mediante pequeñas mordazas elásticas.
(Cortesía de Instron Corporation.)

Laboratorio virtual
Animación

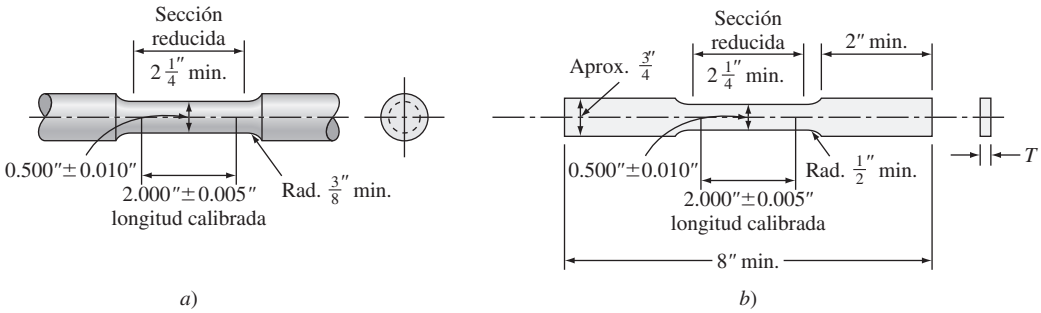


Figura 6.21
Ejemplos de la forma geométrica de probetas utilizadas usualmente en ensayos de tracción. *a*) Probeta redonda estándar para tracción de 2 pulg de longitud de ensayo. *b*) Probeta rectangular estándar para tracción de 2 pulg de longitud de ensayo.
(Según H. E. McGannon [ed.], ASTM Standards, 1968, "The Making, Shaping, and Treating of Steel", 9a. ed. United States Steel, 1971, p. 1220.)

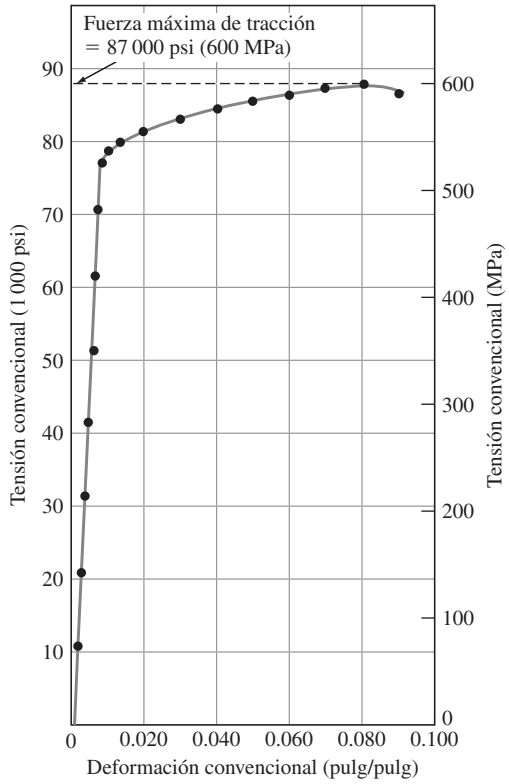


Figura 6.22
Diagrama tensión-deformación convencional de una aleación de aluminio de alta resistencia (7075-T6). La probeta para el ensayo se obtuvo de una placa de ⅝ pulg y tenía un diámetro de 0.50 pulg y 2 pulg de longitud calibrada de ensayo.
(Cortesía de Aluminium Company of America.)

Laboratorio virtual

cional-deformación convencional o diagrama convencional. En la figura 6.22 se muestra el **diagrama convencional de una aleación** de aluminio de alta resistencia.

6.3.1 Valores de propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de tracción y del diagrama tensión-deformación convencional

Las propiedades mecánicas de metales y aleaciones que tienen interés para el diseño estructural en ingeniería, y que pueden obtenerse a partir del ensayo de tracción técnico, son:

1. Módulo de elasticidad
2. Límite elástico convencional de 0.2 por ciento

3. Resistencia a la tracción
4. Porcentaje de alargamiento a fractura
5. Porcentaje de estricción a fractura

Módulo de elasticidad En la primera parte del ensayo de tracción, el metal se deforma elásticamente. Es decir, si la fuerza que actúa sobre la muestra desaparece, la probeta volverá a su longitud inicial. Para metales, la máxima deformación elástica suele ser inferior a 0.5 por ciento. En general, los metales y aleaciones muestran una relación lineal entre la tensión aplicada y la deformación producida en la región elástica del diagrama convencional que se describe por la ley de Hooke:[5]

$$\sigma \text{ (tensión)} = E\epsilon \text{ (deformación)} \qquad \textbf{(6.9)}$$

o

$$E = \frac{\sigma \text{ (tensión)}}{\epsilon \text{ (deformación)}} \text{ (unidades Pa o psi)}$$

Laboratorio virtual

donde E es el **módulo de elasticidad**, o *módulo de Young*.[6]

El módulo de elasticidad está relacionado con la fuerza del enlace entre los átomos del metal o aleación. En la tabla 6.1 se muestra el valor del módulo de elasticidad de algunos metales comunes. Los metales con alto módulo de elasticidad son relativamente rígidos y no flechan fácilmente los aceros; por ejemplo, tienen un alto valor de módulos de 30×10^6 psi (207 GPa),[7] mientras que las aleaciones de aluminio tienen un módulo inferior, alrededor de 10 a 11×10^6 psi (69 a 76 GPa). Nótese que en la región elástica del diagrama convencional, el valor del módulo no varía con el incremento de la tensión.

Límite elástico El **límite elástico** es un valor muy importante para el diseño estructural en ingeniería, pues es el nivel de tensión al que un metal o aleación muestran una deformación plástica significativa. Debido a que no hay un punto definido de la curva tensión-deformación donde acaba la deformación elástica y empieza la deformación plástica, se determina el límite elástico como la tensión a la que se produce una deformación elástica definida. En muchas ocasiones se determina el límite cuando se produce una deformación de 0.2 por ciento, como se muestra en el diagrama convencional de la figura 6.23.

El límite elástico de 0.2 por ciento, también denominado *límite elástico convencional de 0.2 por ciento*, se determina a partir del diagrama convencional, como se muestra en la figura 6.23. Primero se traza una línea paralela a la zona elástica (lineal) del diagrama convencional a una deformación de 0.002 pulg/pulg (m/m), como se indica en la figura 6.23. Después se traza una línea horizontal desde el punto de intersección entre la línea anterior y la parte superior de la curva tensión-deformación hasta que alcance el eje de las tensiones. El límite elástico de 0.2 por ciento es el valor de

[5]Robert Hooke (1635-1703). Físico inglés que estudió la conducta elástica de los sólidos.
[6]Thomas Young (1773-1829). Físico inglés.
[7]SI prefijo G = giga = 10^9.

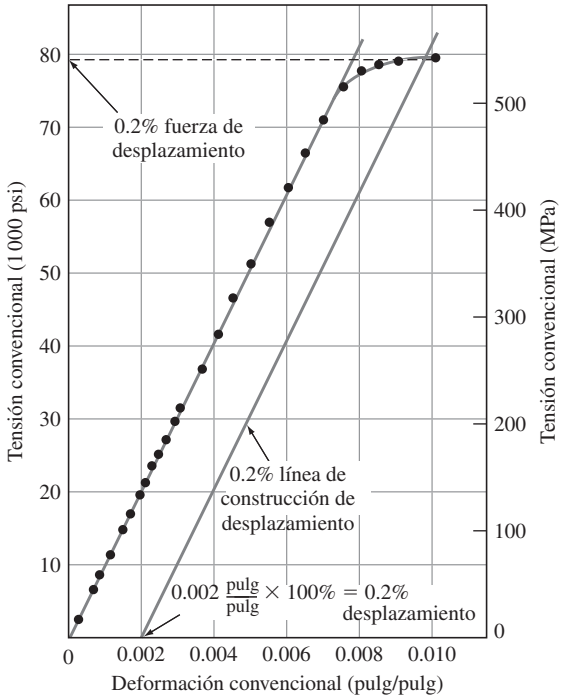


Figura 6.23
Parte lineal del diagrama convencional de la figura 6.22 con el eje de deformaciones expandido para facilitar una determinación más exacta del límite elástico de 0.2 por ciento.
(Cortesía de Aluminium Company of America.)

Laboratorio virtual

tensión donde la línea horizontal interseca el eje de tensión, y en el caso de la curva de tensión-deformación de la figura 6.23, el valor del límite elástico es 78 000 psi. Es necesario puntualizar que el valor de 0.2 por ciento es arbitrario y puede determinarse el límite elástico para cualquier valor de deformación permanente siempre que sea pequeño; por ejemplo, en el Reino Unido es usual el límite elástico de 0.1 por ciento.

Resistencia a la tracción La **resistencia a la tracción** (UTS, por sus siglas en inglés) es la máxima tensión que se alcanza en la curva tensión-deformación. Si la probeta desarrolla un decrecimiento localizado de la sección transversal (comúnmente denominada *estricción*) (figura 6.24), la tensión convencional decrecerá con el incremento de la deformación hasta producirse la fractura, porque la deformación convencional se determina utilizando el área *original* de la sección transversal de la probeta. Cuanto más dúctil es el metal, mayor es la estricción antes de la fractura y más descendente la tensión alejándose del valor de resistencia a la tracción. En aleaciones de aluminio de alta resistencia, con curvas tensión-deformación como la que se

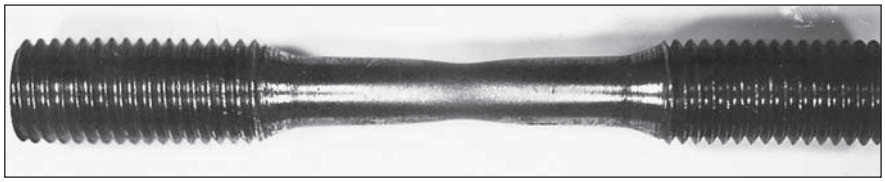


Figura 6.24
Estricción de una probeta de acero dulce. La probeta era uniformemente cilíndrica. Después de soportar la tensión uniaxial a tracción hasta casi la fractura, la sección transversal decreció, es decir, se produjo la estricción de la zona central.

muestra en la figura 6.22, sólo hay un pequeño descenso de la tensión convencional desde el valor resistencia a la tracción porque este tipo de material tiene una ductilidad relativamente baja.

Un punto importante del diagrama tensión-deformación convencional que se debe entender es que el metal o aleación puede soportar tensiones superiores a la propia tensión de fractura. Esto sólo se debe a que se utiliza el área original de la sección transversal para determinar la tensión convencional y que la tensión soportada desciende en la última parte del ensayo.

La resistencia a la tracción de un metal se determina trazando una línea horizontal desde el punto máximo de la curva tensión-deformación hasta el eje de tensiones. El valor de tensión donde esa línea interseca al eje de tensiones se denomina *resistencia máxima* o *resistencia a la tracción*. Para la aleación de aluminio de la figura 6.22, la resistencia a la tracción es de 87 000 psi.

Este parámetro no es de mucha utilidad en el diseño ingenieril con aleaciones dúctiles porque se produce mucha deformación plástica antes de alcanzarlo. No obstante, la resistencia a la tracción puede aportar alguna información sobre la presencia de defectos. Si el metal contiene porosidad o inclusiones, estos defectos pueden producir que el valor de la resistencia máxima sea menor que la normal.

Porcentaje de alargamiento El porcentaje de alargamiento que una probeta a tracción soporta durante el ensayo proporciona un valor de la ductilidad del metal. La ductilidad de metales suele expresarse como porcentaje de alargamiento, usualmente determinado en probetas de 2 pulgadas (5.1 cm) (figura 6.21). En general, a mayor ductilidad del metal (a mayor capacidad de deformación), mayor porcentaje de deformación. Por ejemplo, una chapa de 0.062 pulgadas (1.6 mm) de aluminio comercialmente puro en estado reblandecido (aleación a 1100-0), tiene un alto porcentaje del mismo espesor de una aleación de 35 por ciento, mientras que una muestra del mismo espesor de aluminio de alta resistencia en estado de máxima dureza 7075-T6 solamente tiene un porcentaje de alargamiento de 11 por ciento.

Como se ha mencionado previamente, durante el ensayo de tracción se puede utilizar un extensómetro para determinar continuamente la deformación producida durante el ensayo. No obstante, el porcentaje de deformación de una probeta después de la fractura se puede medir uniendo los fragmentos y midiendo la longitud final con un calibre.

El porcentaje de alargamiento se calcula mediante la ecuación:

Laboratorio virtual

$$\% \text{ alargamiento} = \frac{\text{longitud final*} - \text{longitud inicial*}}{\text{longitud inicial}} \times 100\%$$

$$= \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \qquad \textbf{(6.10)}$$

El porcentaje de alargamiento a fractura tiene importancia no sólo como medida de la ductilidad, sino también como índice de la calidad del metal. Si existe porosidad o inclusiones en el metal, o si existe un deterioro debido a un sobrecalentamiento del mismo, el porcentaje de alargamiento decrecerá por debajo del valor normal.

Porcentaje de estricción La ductilidad de un metal o aleación también se puede expresar en términos de porcentaje de reducción de área o estricción. Esta magnitud normalmente se obtiene del ensayo de tracción utilizando una probeta de 0.50 pulgadas (12.7 mm) de diámetro. Después del ensayo, se determina el diámetro de la sección transversal de la zona de fractura. Utilizando las medidas del diámetro inicial y del diámetro final, el porcentaje de estricción se determina según la ecuación

$$\% \text{ reducción en área} = \frac{\text{área inicial} - \text{área final}}{\text{área inicial}} \times 100\%$$

$$= \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% \qquad \textbf{(6.11)}$$

El porcentaje de reducción en el área, como el porcentaje de alargamiento, es una medida de la ductilidad del metal y un índice de su calidad. El porcentaje de reducción en el área se puede disminuir si existen defectos como inclusiones y/o porosidad en la muestra metálica.

*La longitud inicial es la longitud entre las marcas de calibración realizadas sobre la muestra antes del ensayo. La longitud final es la longitud entre esas mismas marcas después de unir los dos fragmentos resultantes del ensayo (véase problema de ejemplo 6.5).

PROBLEMA DE EJEMPLO 6.7

Una probeta de acero al carbono 1030 de 0.500 pulgadas de diámetro se ensaya hasta la fractura en una máquina de ensayo. El diámetro de la probeta en la zona de fractura es de 0.343 pulgadas. Calcule el porcentaje de estricción de la muestra.

■ Solución

$$\% \text{ reducción en área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{A_f}{A_0}\right)(100\%)$$

$$= \left[1 - \frac{(\pi/4)(0.343 \text{ pulg})^2}{(\pi/4)(0.500 \text{ pulg})^2}\right](100\%)$$

$$= (1 - 0.47)(100\%) = 53\% \blacktriangleleft$$

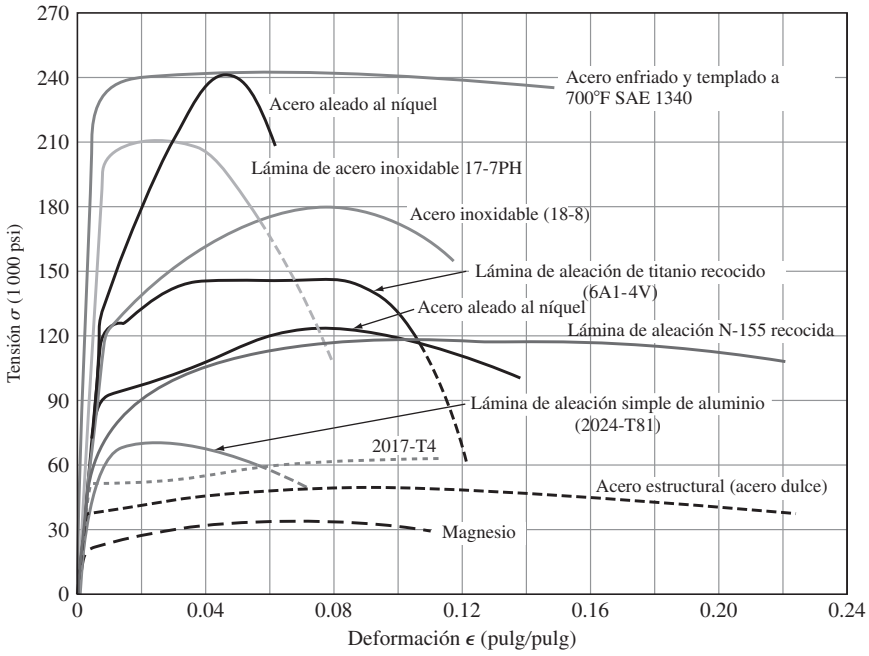


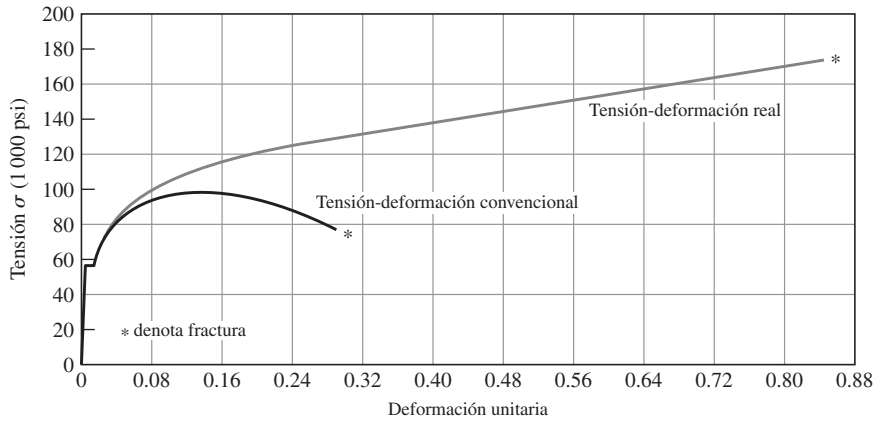
Figura 6.25
Curvas tensión-deformación convencional de algunos metales y aleaciones seleccionados.
(Según J. Marin, "Mechanical Behavior of Engineering Materials", Prentice-Hall, 1962, p. 24, y nuevos datos.)

6.3.2 Comparación de curvas tensión-deformación convencional para algunas aleaciones seleccionadas

En la figura 6.25 se muestran las curvas tensión-deformación convencional de algunos metales y aleaciones. La aleación entre metales o entre metales y no metales y los tratamientos térmicos pueden afectar mucho la resistencia a la tracción y la ductilidad de los metales. Las curvas tracción-deformación convencional de la figura 6.25 muestran una gran variación de la resistencia a la tracción. El magnetismo elemental tiene una resistencia de 35 ksi (1 ksi = 1 000 psi), mientras que el acero SAE 1340 templado en agua y revenido a 700°F (370°C) tiene una resistencia a la tracción de 240 ksi.

6.3.3 Tensión real y deformación real

La tensión convencional se calcula dividiendo la fuerza aplicada F a una probeta de tracción por el área de su sección inicial A_0 (ecuación 6.3). Puesto que la sección transversal de la muestra cambia continuamente durante el ensayo de tracción, la tensión convencional así calculada no es precisa. Durante el ensayo de tracción y después de que aparezca la estricción de la muestra (figura 6.24), la tensión convencional dismi-



Laboratorio virtual

Figura 6.26
Comparación entre la curva tensión-deformación real y la curva tensión-deformación convencional (nominal) de un acero de bajo carbono.
(Según H. E. McGannon [ed.], "The Making, Shaping, and Treating of Steel", United States Steel, 1971.)

nuye mientras la deformación aumenta, formándose un máximo en la curva tensión-deformación convencional (figura 6.26). Por tanto, una vez iniciada la estricción durante el ensayo de tracción, la tensión real es mayor que la tensión convencional. La tensión real y la deformación real se definen mediante:

$$\text{Tensión real } \sigma_t = \frac{\text{F (medida de la fuerza uniaxial aplicada sobre la muestra de ensayo)}}{A_i \text{ (área de la mínima sección transversal de la probeta)}} \tag{6.12}$$

$$\text{Deformación real } \epsilon_t = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0} \tag{6.13}$$

donde l_0 es la longitud inicial de la muestra l_i es la longitud instantánea durante el ensayo. Si se admite que el volumen de la sección calibrada de la muestra se mantiene constante durante el ensayo, entonces $l_0 A_0 = l_i A_i$ o

$$\frac{l_i}{l_0} = \frac{A_0}{A_i} \qquad \text{y} \qquad \epsilon_t = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A_i}$$

En la figura 6.26 se comparan las curvas de tensión-deformación convencional y tensión-deformación real de un acero de bajo carbono.

En ingeniería, el diseño no se basa en la tensión real hasta fractura, sino hasta que se excede el límite elástico y el material empieza a deformarse. Los ingenieros utilizan en diseño estructural el límite elástico convencional de 0.2 por ciento con los co-

eficientes de seguridad adecuados. No obstante, algunas veces, es necesario utilizar las curvas tensión-deformación real en investigación.

PROBLEMA DE EJEMPLO 6.8

Compare la tensión y deformación convencionales con la tensión y deformaciones reales de un acero de bajo carbono en un ensayo de tracción con las siguientes condiciones.

$$\text{Carga aplicada a la muestra} = 17\,000 \text{ lb}_f$$

$$\text{Diámetro inicial de la muestra} = 0.500 \text{ pulgadas}$$

$$\text{Diámetro de la muestra sometida a una carga de } 17\,000 \text{ lb}_f = 0.472 \text{ pulgadas}$$

■ **Solución**

$$\text{Área inicial } A_0 = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} (0.500 \text{ pulg})^2 = 0.196 \text{ pulg}^2$$

$$\text{Área bajo carga } A_i = \frac{\pi}{4} (0.472 \text{ pulg})^2 = 0.175 \text{ pulg}^2$$

Suponiendo que no hay cambio de volumen durante el alargamiento, $A_0 l_0 = A_i l_i$ o $l_i/l_0 = A_0/A_i$.

$$\text{Tensión convencional} = \frac{F}{A_0} = \frac{17\,000 \text{ lb}_f}{0.196 \text{ pulg}^2} = 86\,700 \text{ psi} \blacktriangleleft$$

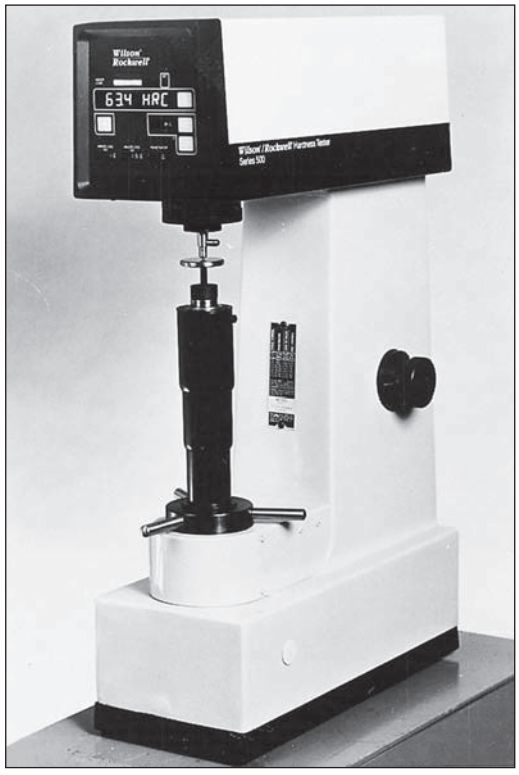
$$\text{Deformación convencional} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{A_0}{A_i} - 1 = \frac{0.196 \text{ pulg}^2}{0.175 \text{ pulg}^2} - 1 = 0.12$$

$$\text{Tensión real} = \frac{F}{A_i} = \frac{17\,000 \text{ lb}_f}{0.175 \text{ pulg}^2} = 97\,000 \text{ psi} \blacktriangleleft$$

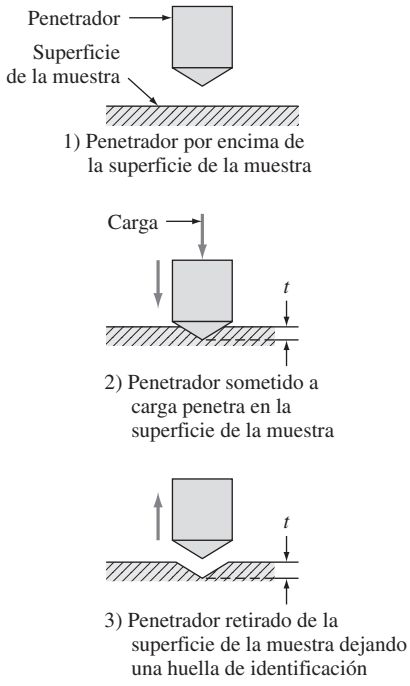
$$\text{Deformación real} = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A_i} = \ln \frac{0.196 \text{ pulg}^2}{0.175 \text{ pulg}^2} = \text{In } 1.12 = 0.113$$

6.4 DUREZA Y ENSAYO DE DUREZA

La **dureza** es una medida de la resistencia de un metal a la deformación permanente (plástica). La dureza de un metal se mide forzando la indentación de un penetrador en la superficie del metal. El penetrador, que normalmente es una bola, pirámide o cono, está fabricado con un material mucho más duro que el material a ensayar. Por ejemplo, el material empleado en estos penetradores suele ser acero templado, carburo de tungsteno o diamante. En la mayoría de los ensayos de dureza normalizados se aplica lentamente una carga conocida, que presiona el penetrador contra la superficie del metal a ensayar y perpendicularmente a ésta [figura 6.27*b* (2)]. Después de producir la indentación, se retira el penetrador [figura 6.27*b* (3)]. Se calcula o se lee en un dial un número empírico de dureza basado en el área del corte transversal de la huella producida o en su profundidad.



a)



b)

Laboratorio virtual

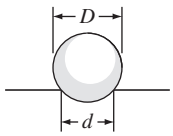
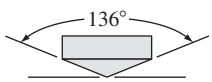
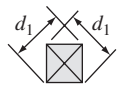
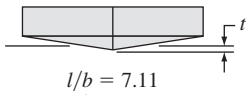
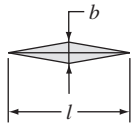
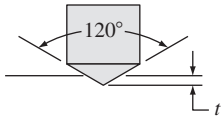
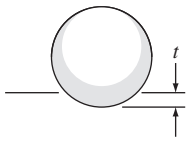
Figura 6.27
a) Durómetro para dureza Rockwell. *(Cortesía de Page-Wilson, Co.)*
b) Etapas para la medida de la dureza con un penetrador cónico de diamante. La profundidad *t* determina la dureza del metal. A menor valor de *t*, mayor dureza del material.

En la tabla 6.2 se muestran los tipos de penetradores y los tipos de huellas producidas asociados a cuatro ensayos de dureza comunes: Brinell, Vickers, Knoop y Rockwell. El número de dureza para cada uno de estos ensayos depende del penetrador y de la carga aplicada. En la figura 6.27 se muestra un moderno durómetro Rockwell con un dial digital.

La dureza de un metal se mide según sea la facilidad con que puede ser deformada plásticamente. Por tanto, se puede determinar una relación experimental entre la dureza y la resistencia para cada metal en particular. El ensayo de dureza es mucho más simple que el ensayo de tracción y puede ser no destructivo (es decir, la presencia de una pequeña huella no impide la utilización del objeto ensayado). Por estas razones, es común la utilización del ensayo de dureza en el control de calidad de procesos industriales.

Laboratorio virtual

Tabla 6.2 Ensayos de dureza

Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador: Vista lateral	Forma del penetrador: Vista en planta	Carga	Fórmula del número de dureza
Brinell	Esfera de 10 mm fabricada de acero o carburo de volframio			P	$\text{BHN} = \dfrac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirámide de diamante			P	$\text{VHN} = \dfrac{1.72P}{d_1^2}$
Microdureza Knoop	Pirámide de diamante	 $l/b = 7.11$ $b/t = 4.00$		P	$\text{KHN} = \dfrac{14.2P}{l^2}$
Rockwell A, C, D	Cono de diamante			60 kg R_A = 150 kg R_C = 100 kg R_D =	100–500f
B, F, G	Esfera de acero de $\frac{1}{16}$ pulgadas			100 kg R_B = 60 kg R_F = 150 kg R_G = 100 kg R_E =	130–500f
E	Esfera de acero de $\frac{1}{8}$ pulgadas				

Fuente: Según H. W. Hayden, W. G. Moffatt y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. III, Wiley, 1965, p. 12.

6.5 DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE MONOCRISTALES METÁLICOS

6.5.1 Bandas de deslizamiento en líneas de deslizamiento en la superficie de cristales metálicos

Primero se consideró la deformación permanente de una barra de un monocristal cilíndrico de zinc al que se aplicó una tensión superior a su límite elástico. El examen de ese cristal de zinc después de la deformación muestra unas marcas en forma de es-

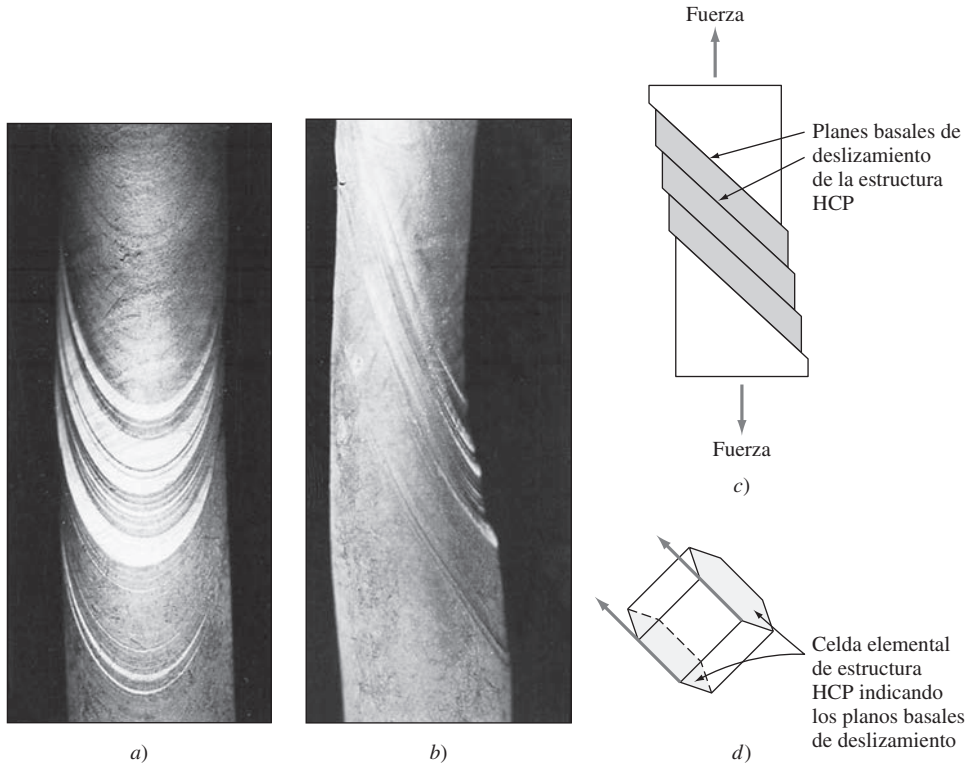


Figura 6.28
Monocristal de zinc deformado plásticamente mostrando banda de deslizamiento: *a*) vista frontal de cristal real, *b*) vista lateral de cristal real, *c*) vista lateral esquemática indicando los planos basales de deslizamiento de la estructura HCP del cristal y *d*) celda elemental de estructura HCP indicando los planos basales de deslizamiento.
(Las fotografías del monocristal de zinc son cortesía del Prof. Earl Parker de la Universidad de California en Berkeley.)

calones denominadas **bandas de deslizamiento** (figura 6.28*a* y *b*). Las bandas de deslizamiento se forman por el desplazamiento de los átomos de metal sobre planos cristalográficos específicos denominados *planos de deslizamiento*. La superficie del monocristal de zinc ilustra claramente la formación de bandas de deslizamiento porque el deslizamiento en estos **cristales** está inicialmente restringido al desplazamiento sobre planos basales de la estructura HCP (figura 6.28*c* y *d*).

En monocristales de metales dúctiles con estructura FCC como cobre y aluminio, el deslizamiento tiene lugar en varios planos de deslizamiento; como consecuencia, el patrón de bandas de deslizamiento en las superficies de estos materiales ya deformados es más uniforme (figura 6.29). Un examen minucioso de la superficie amplia de metal deformado muestra que el desplazamiento ha ocurrido en muchos planos de deslizamiento del interior de las bandas de deslizamiento (figura 6.30). Estos pequeños escalones denominados *líneas de deslizamiento* están separados por 50 a 500 átomos, aproximadamente; mientras que las bandas de deslizamiento están separadas unos 10 000 diámetros atómicos. Lamentablemente, los términos banda de deslizamiento y líneas de deslizamiento se utilizan muchas veces de forma indiscriminada.

Figura 6.29
Patrón de bandas de deslizamiento en la superficie de un monocristal de cobre después de una deformación de 0.9 por ciento. (Ampliación 100×.)
[Según F. D. Rosi. Trans. AIME, 200:1018 (1954).]

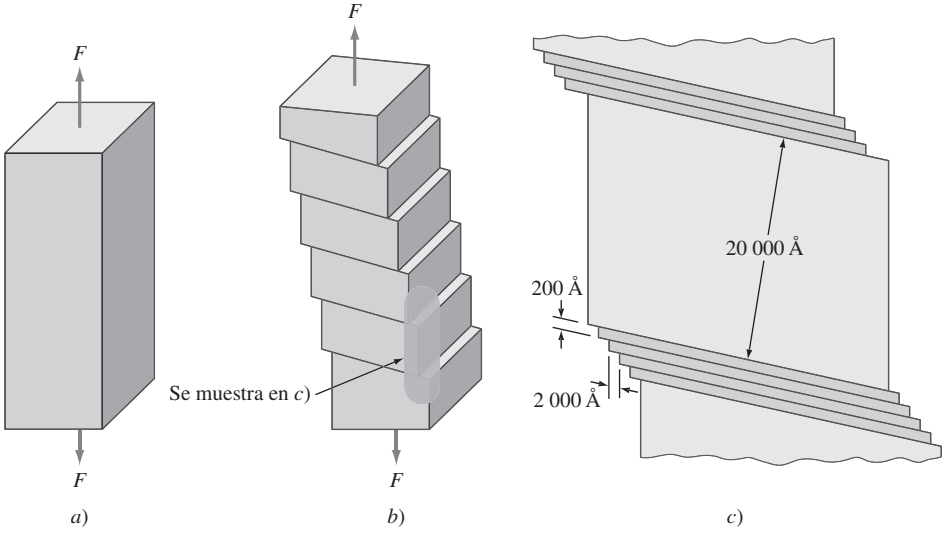


Figura 6.30
Formación de bandas de deslizamiento durante la deformación plástica. *a*) Un monocristal sometido a una fuerza de tracción. *b*) Las bandas de deslizamiento aparecen cuando la tensión aplicada supera la tensión de descendencia. Bloques de cristal desplazados unos respecto a otros. *c*) La región sombreada de *b*) ampliada. El deslizamiento tiene lugar en un gran número de planos de deslizamiento muy cercanos y paralelos. Esta región se denomina *banda de deslizamiento* y aparece como una línea a menor ampliación.
(Según M. Eisenstadt, "Introduction to Mechanical Properties of Materials", Macmillan, 1971, p. 219.)

Animación

6.5.2 Deformación plástica de cristales metálicos por el mecanismo de deslizamiento

En la figura 6.31 se muestra un modelo atómico que permitiría explicar el deslizamiento simultáneo de un conjunto de átomos sobre otro conjunto en un cristal metálico perfecto. Los cálculos realizados a partir de este modelo indican que la resistencia de los cristales metálicos debería ser entre 1 000 a 10 000 veces mayor que la resistencia a cizalladura observada. Por tanto, no puede aplicarse este modelo de deslizamiento atómico en grandes cristales metálicos reales.

Para que se produzca la deformación de cristales metálicos grandes a la baja tensión de cizalladura observada, es necesaria una alta densidad de imperfecciones cristalinas conocidas como *dislocaciones*. Un gran número de estas dislocaciones (~ 10^6 cm/cm^3) se forma durante la solidificación del metal, pero se generan muchas más durante la deformación del metal; debido a esto, un metal severamente deformado puede alcanzar una densidad de dislocaciones de hasta 10^{12} cm/cm^3. En la figura 6.32 se muestra esquemáticamente cómo una *dislocación de arista*, debido a la acción de una *tensión de cizalladura*, puede producir un desplazamiento unitario. En este proceso se requiere una tensión relativamente pequeña para producir el deslizamiento porque sólo un pequeño número de átomos se desliza a la vez.

Una situación análoga a la descrita para el movimiento de una dislocación en un metal por la acción de una tensión de cizalladura, ocurre en el movimiento de una alfombra de grandes dimensiones con una ondulación que la cruza. Mover la alfombra tirando por uno de sus extremos puede resultar imposible debido a la fricción entre el suelo y la alfombra. Sin embargo, generando una ondulación en la alfombra (equivalente a una dislocación en un cristal metálico), y empujando esa ondulación, puede moverse poco a poco la alfombra a lo largo de la habitación (figura 6.32*d*).

Las dislocaciones presentes en los cristales reales se pueden observar mediante microscopia electrónica de transmisión aplicada a una fina lámina de metal donde aparecen como líneas debido a que el desorden atómico asociado a la dislocación interfiere en el camino de transmisión del haz de electrones del microscopio. En la figura 6.33 se muestra una distribución de paredes de dislocaciones presente en una muestra de aluminio levemente deformado y la estructura celular asociada. El interior de las células está relativamente libre de dislocaciones, pero las paredes que las separan tienen una densidad de dislocaciones elevada.

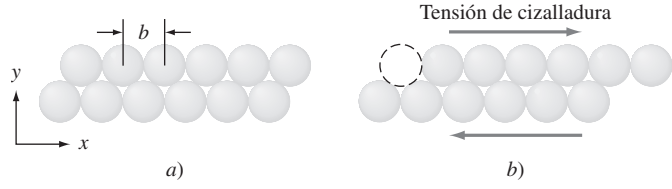
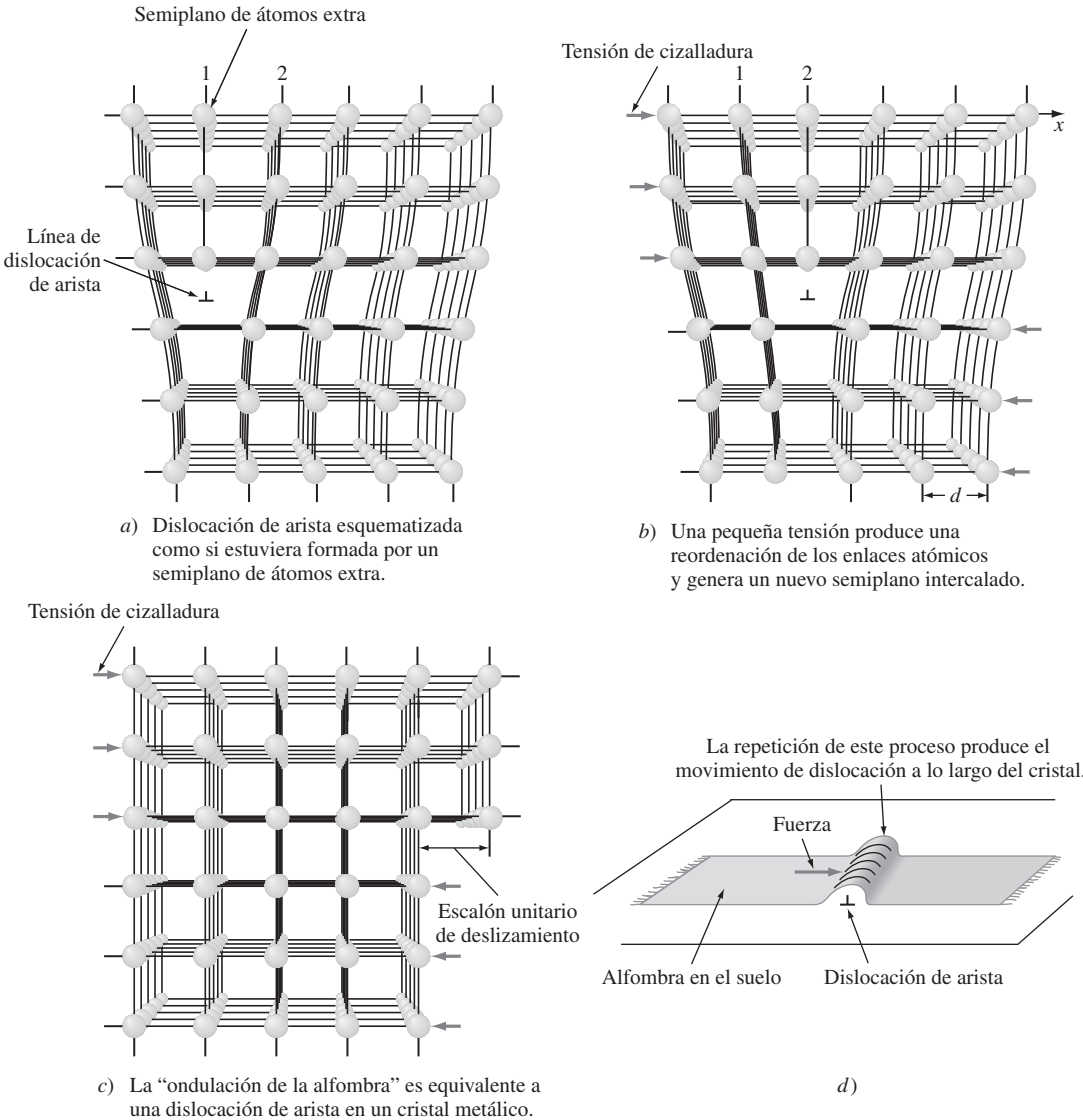


Figura 6.31
Como se indica en esta figura, durante la deformación plástica por cizalladura de cristales metálicos grandes *no* se produce el desplazamiento de grupos numerosos de átomos unos sobre otros porque el proceso requiere demasiada energía. Por el contrario, tiene lugar un proceso de baja energía asociado al deslizamiento de un pequeño grupo de átomos.



a) Dislocación de arista esquematizada como si estuviera formada por un semiplano de átomos extra.

b) Una pequeña tensión produce una reordenación de los enlaces atómicos y genera un nuevo semiplano intercalado.

c) La "ondulación de la alfombra" es equivalente a una dislocación de arista en un cristal metálico.

d)

Figura 6.32
Ilustración esquemática de cómo el movimiento de una dislocación de arista produce un deslizamiento unitario bajo la acción de una pequeña tensión de cizalladura. *a*) Dislocación de arista esquematizada como si estuviera formada por un semiplano de átomos extra. *b*) Una pequeña tensión produce una reordenación de los enlaces atómicos y genera un nuevo semiplano intercalado. *c*) La repetición de este proceso produce el movimiento de la dislocación a lo largo de cristal. Este proceso requiere menos energía que el descrito en la figura 6.30. *(Según A. G. Guy, "Essentials of Materials Science", McGraw-Hill, 1976, p. 153.)*
d) "Analogía de la ondulación" de la alfombra. Durante una deformación plástica, una dislocación se mueve a través de un cristal metálico de una forma similar a como lo hace una ondulación empujada a lo largo de una alfombra colocada sobre el suelo. En ambos casos se produce un pequeño movimiento relativo, sea por el paso de dislocación o de la ondulación, y la cantidad de energía necesaria en este proceso es pequeña.

Animación

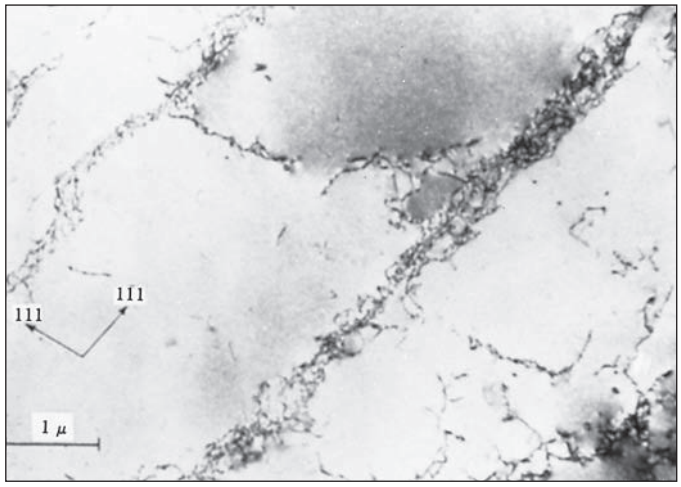


Figura 6.33
Estructura celular de dislocaciones presente en una muestra de aluminio levemente deformado observada por microscopia electrónica de transmisión. Las celdas están relativamente libres de dislocaciones pero las paredes que las separan tienen una densidad de dislocaciones elevada.
(Según P. R. Swann en G. Thomas y J. Washburn [eds.], "Electron Microscopy and Strength of Crystals", Wiley, 1963, p. 133.)

6.5.3 Sistemas de deslizamiento

Las dislocaciones producen los desplazamientos atómicos sobre planos cristalinos de deslizamiento específicos y en direcciones cristalinas de deslizamiento específicas. Usualmente los planos de deslizamiento son los de máxima compactibilidad, y también los más separados entre sí. El desplazamiento se favorece en los planos de máxima capacidad porque la tensión de cizalladura requerida para el deslizamiento atómico es menor que en los planos con menor compactibilidad (figura 6.34). No obstante, si el deslizamiento sobre un plano de máxima compactibilidad está restringido, por ejemplo, debido a una tensión local elevada, pueden activarse planos de empaquetamiento menor. También se favorece el deslizamiento en direcciones de máxima compactibilidad porque la energía requerida para mover átomos de una posición a otra es menor cuando esos átomos están más cerca.

La combinación de un plano de deslizamiento y una dirección de deslizamiento se denomina **sistema de deslizamiento**. El deslizamiento en metales ocurre en determinados sistemas de deslizamiento que son característicos de cada estructura cristalina. En la tabla 6.3 se agrupan los planos de deslizamiento y direcciones de deslizamiento predominantes en las estructuras cristalinas FCC, BCC y HCP.

En metales con estructura cristalina FCC, el deslizamiento tiene lugar en los planos octaédricos $\{111\}$ que son de máxima compacidad y en las direcciones de máxima compactibilidad $\langle 1\bar{1}0\rangle$. Hay ocho planos octaédricos $\{111\}$ en la estructura cristalina FCC (figura 6.35) opuestas de un octaedro y son paralelos de dos a dos, por lo que se consideran el mismo plano de deslizamiento del tipo (111). Por tanto, sólo hay cuatro planos del tipo (111) distintos en la estructura FCC. Cada plano del tipo (111) contiene tres direcciones de deslizamiento del tipo $[1\bar{1}0]$ distintas porque sólo se considera uno de los sen-

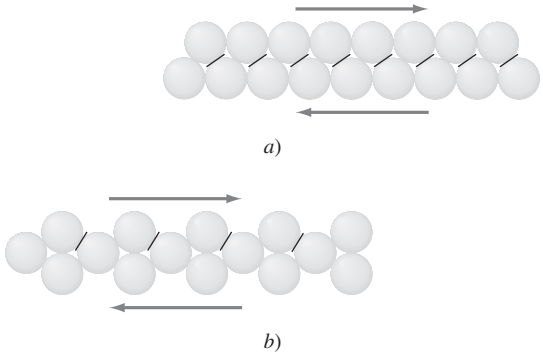


Figura 6.34
Comparación del deslizamiento atómico sobre *a*) un plano de máxima compactibilidad y *b*) un plano sin máxima compactibilidad. El deslizamiento está favorecido en el plano de máxima compactibilidad porque se requiere menos fuerza para mover los átomos desde una posición a la más próxima, como se indica por la pendiente de las líneas entre átomos. Nótese que las dislocaciones se mueven un espacio atómico cada vez.
(Según A. H. Cottrell, The Nature of Metals, "Materials", Scientific American, 1967, p. 48. Derechos de autor © por Scientific American, Inc. Todos los derechos reservados.)

tidos de cada dirección. Así, para la estructura cristalina FCC hay 4 sistemas de deslizamiento $\times$ 3 direcciones de deslizamiento $=$ 12 sistemas de deslizamiento (tabla 6.3).

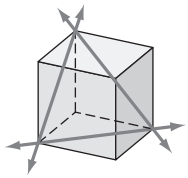
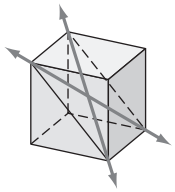
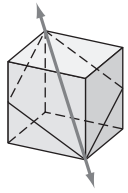
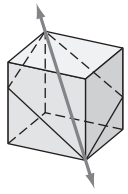
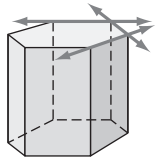
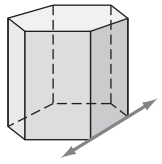
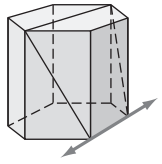
La estructura BCC *no* es una estructura de máxima compactibilidad y no tiene planos predominantes de máxima compactibilidad como la estructura FCC. Los planos {110} son los de mayor densidad atómica y, normalmente, el deslizamiento se produce en estos planos, pero en metales BBC el deslizamiento también se produce en planos {112} y {123}. Puesto que los planos de deslizamiento no son de máxima compactibilidad, la tensión de cizalladura necesaria para producir el deslizamiento en metales BBC es mayor que en metales FCC. La dirección de deslizamiento en metales BCC siempre es del tipo $\langle\bar{1}11\rangle$. Puesto que hay seis planos de deslizamiento del tipo (110) y en cada uno se puede producir el deslizamiento en dos direcciones del tipo $[\bar{1}11]$, hay $6 \times 2 = 12$ sistemas de deslizamiento del tipo $\{110\}\ \langle\bar{1}11\rangle$.

En la estructura HCP, el plano basal (0001) es un plano de máxima compactibilidad y es el plano habitual de deslizamiento en metales HCP como el Zn, Cd y Mg, que tienen una relación *c/a* alta (tabla 6.3). Pero en metales con relación *c/a* baja como el Ti, Zr y Be, el deslizamiento también puede ocurrir en los planos prismáticos $\{10\bar{1}0\}$ y en los piramidales $\{10\bar{1}1\}$. En todos los casos, la dirección de deslizamiento es del tipo $\langle11\bar{2}0\rangle$. El limitado número de sistemas de deslizamiento de los metales HCP restringe su ductilidad.

6.5.4 Tensión de cizalladura crítica en monocristales metálicos

La tensión necesaria para producir deslizamiento en un monocristal de un metal puro depende principalmente de la estructura cristalina del metal, de las características del enlace atómico, la temperatura a la que se deforma y de la orientación de los planos de

Tabla 6.3 Sistemas de deslizamiento observados en estructuras cristalinas

Estructura	Plano de deslizamiento	Dirección de deslizamiento	Número de sistemas de deslizamiento	
FCC: Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, γFe, . . .	{111}	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	$4 \times 3 = 12$	
BCC: αFe, W, Mo, β latón	{110}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$6 \times 2 = 12$	
αFe, Mo, W, Na	{211}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$12 \times 1 = 12$	
αFe, K	{321}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$24 \times 1 = 24$	
HCP: Cd, Zn, Mg, Ti, Be, . . .	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$1 \times 3 = 3$	
Ti (planos prismáticos)	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$3 \times 1 = 3$	
Ti, Mg (planos piramidales)	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$6 \times 1 = 6$	

Fuente: Tomado de H. W. Hayden, W. G. Moffatt y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. III, Wiley, 1965, p. 100.

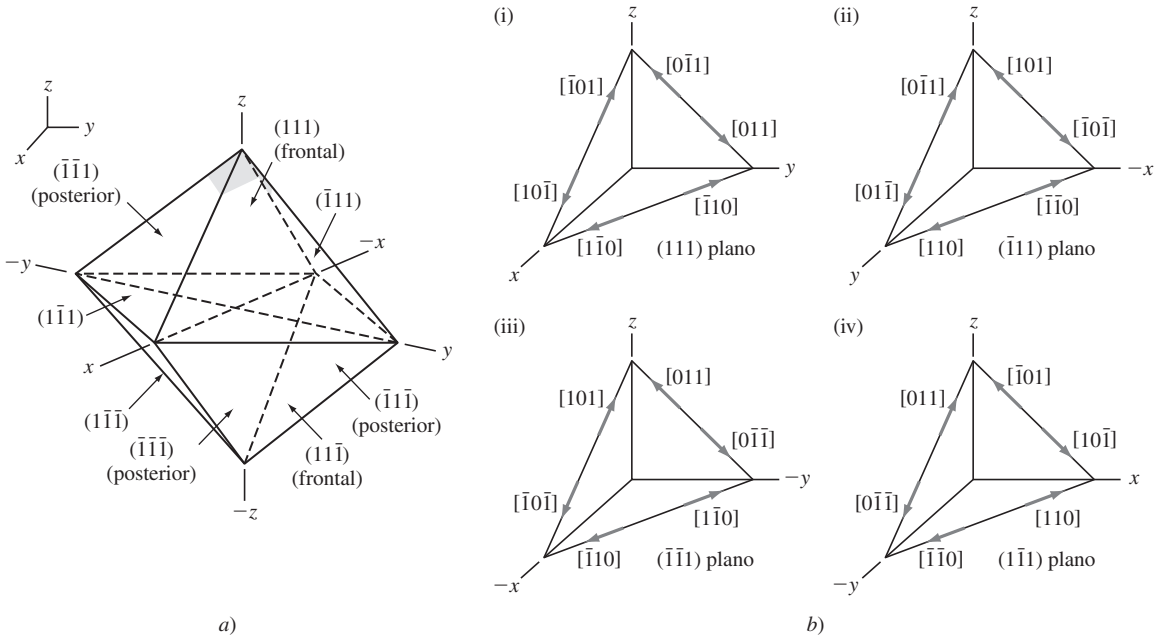


Figura 6.35
Planos de deslizamiento y direcciones de deslizamiento de la estructura cristalina FCC. *a*) Sólo cuatro de ocho planos octaédricos {111} se consideran planos de deslizamiento puesto que los planos opuestos uno a otro se consideran el mismo plano de deslizamiento y *b*) para cada plano de deslizamiento hay tres direcciones de deslizamiento $\langle 1\bar{1}0 \rangle$, de nuevo se considera que los dos sentidos de una misma dirección corresponden a una sola dirección de deslizamiento. Nótese que sólo se muestran las direcciones de deslizamiento de los planos de deslizamiento de la parte superior del octaedro formado por los planos octaédricos. Por tanto, hay 4 planos de deslizamiento $\times$ 3 direcciones de deslizamiento que dan un total de 12 sistemas de deslizamiento para la estructura cristalina FCC.

deslizamiento activos respecto a la tensión de cizalladura. El deslizamiento se inicia cuando la tensión de cizalladura que actúa en el plano de deslizamiento y en la dirección de deslizamiento alcanza un determinado valor denominado *tensión de cizalladura crítico* τ_c. Esencialmente, este valor es el límite de descendencia del monocristal y es equivalente al límite de descendencia límite elástico del metal o aleación policristalina determinado a partir de la curva tensión-deformación del ensayo de tracción.

En la tabla 6.4 se agrupan distintos valores de la tensión de cizalladura crítica de monocristales de algunos metales puros a temperatura ambiente. Los metales HCP Zn, Cd y Mg tienen una tensión de cizalladura crítica entre 0.18 y 0.77 MPa. Por otra parte, el titanio HCP tiene un símbolo de τ_c de 13.7 MPa. Se considera que este valor de τ_c se debe a un cierto carácter covalente del enlace metálico formado. Metales FCC puros como Ag y Cu presentan bajos valores de τ_c, 0.48 y 0.65 MPa, respectivamente, debido a sus numerosos sistemas de deslizamiento.

6.5.5 Ley de Schmid

La relación entre la tensión de tracción uniaxial que actúa sobre un monocristal cilíndrico de metal puro y la tensión de cizalladura resultante que actúa en un sistema de

Tabla 6.4 Sistemas de deslizamiento a temperatura ambiente y tensiones de cizalladura crítica de monocristales metálicos

Metal	Estructura cristalina	Pureza (%)	Plano de deslizamiento	Dirección de deslizamiento	Tensión de cizalladura crítica (MPa)
Zn	HCP	99.999	(0001)	$[11\bar{2}0]$	0.18
Mg	HCP	99.996	(0001)	[1120]	0.77
Cd	HCP	99.996	(0001)	$[11\bar{2}0]$	0.58
Ti	HCP	99.99	(1010)	$[11\bar{2}0]$	13.7
		99.9	(1010)	$[11\bar{2}0]$	90.1
Ag	FCC	99.99	(111)	$[1\bar{1}0]$	0.48
		99.97	(111)	$[1\bar{1}0]$	0.73
		99.93	(111)	$[1\bar{1}0]$	1.3
Cu	FCC	99.999	(111)	$[1\bar{1}0]$	0.65
		99.98	(111)	$[1\bar{1}0]$	0.94
Ni	FCC	99.8	(111)	$[1\bar{1}0]$	5.7
Fe	BCC	99.96	(110)	$[\bar{1}11]$	27.5
			(112)		
			(123)		
Mo	BCC	. . .	(110)	$[\bar{1}11]$	49.0

Fuente: Según G. Dieter, "Mechanical Metallurgy", 2a. ed., McGraw-Hill, 1976, p. 129.

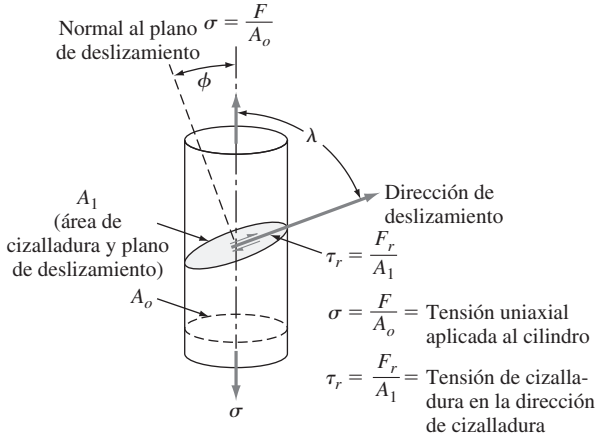


Figura 6.36
La tensión axial σ puede producir una tensión de cizalladura resultante τ_r que cause el movimiento de dislocaciones en el plano de deslizamiento A_1 y en la dirección de deslizamiento.

deslizamiento del interior del cilindro, se puede establecer del modo siguiente. Considérese una tensión de tracción uniaxial σ que actúa sobre el cilindro metálico, como se muestra en la figura 6.36. Sea A_0 el área normal de la fuerza axial F y A_1 el área del plano de deslizamiento o área de cizalladura sobre la que actúa la fuerza de cizalladura resultante F_r. Se puede orientar el plano de deslizamiento y la dirección de deslizamiento definiendo los ángulos ϕ y λ. El ángulo entre la fuerza uniaxial F es ϕ y la normal al plano de deslizamiento de área A_1 y λ es el ángulo entre la fuerza axial y la dirección de deslizamiento.

Para que se muevan las dislocaciones en el sistema de deslizamiento, es necesario que la fuerza axial aplicada en el cilindro genere una tensión de cizalladura en la dirección de deslizamiento suficiente. La tensión de cizalladura resultante es:

$$\tau_r = \frac{\text{fuerza de cizalladura}}{\text{área de cizalladura (área del plano de deslizamiento)}} = \frac{F_r}{A_1} \tag{6.14}$$

La fuerza de cizalladura resultante F_r está relacionada con la fuerza axial F mediante la expresión $F_r = F \cos \lambda$. El área del plano de deslizamiento (área de cizalladura) $A_1 = A_0/\cos \phi$. Dividiendo la fuerza de cizalladura $F \cos \lambda$ por el área de cizalladura $A_0/\cos \phi$, se obtiene la expresión:

$$\tau_r = \frac{F \cos \lambda}{A_0/\cos \phi} = \frac{F}{A_0} \cos \lambda \cos \phi = \sigma \cos \lambda \cos \phi \tag{6.15}$$

que se denomina *ley de Schmid*. Considérese un problema de ejemplo para calcular la tensión de cizalladura resultante cuando una tensión axial actúa sobre un sistema de deslizamiento.

PROBLEMA DE EJEMPLO 6.9

Calcule la tensión de cizalladura resultante en el sistema de deslizamiento (111) $[0\bar{1}1]$ de la celda unidad de un monocristal de níquel puro si se aplica una tensión de 13.7 MPa [001] en la dirección de la celda unidad.

■ Solución

Por geometría, el ángulo λ entre la tensión aplicada y la dirección de deslizamiento es de 45°, como se muestra en la figura EP6.9*a*. En el sistema cúbico los índices de la dirección normal a un plano cristalino son los mismos que los índices de Miller de plano cris-

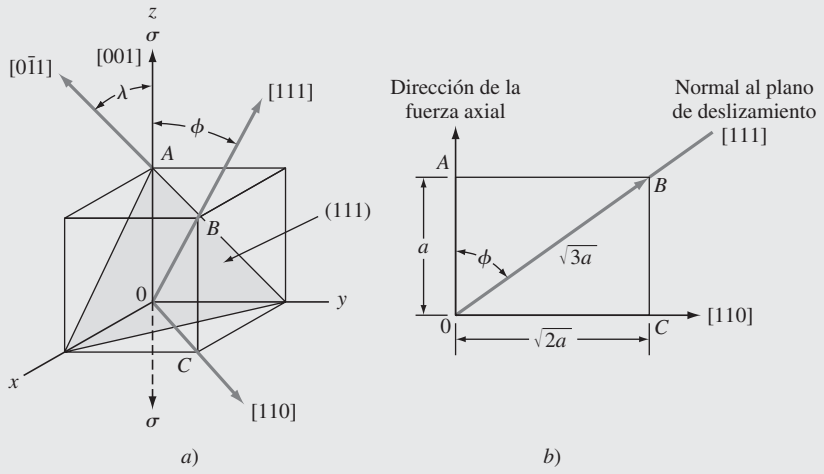


Figura EP6.9
Celda unidad FCC sobre la que actúa una tensión a tracción en la dirección [001] que produce una tensión de cizalladura resultante en el sistema de deslizamiento (111) $[0\bar{1}1]$.

talino. Por lo tanto, la normal al plano (111), que es el plano de deslizamiento, es la dirección [111]. A partir de la figura EP6.9*b*,

$$\cos\phi = \frac{a}{\sqrt{3}a} = \frac{1}{\sqrt{3}} \qquad \text{o} \qquad \phi = 54.74°$$

$$\tau_r = \sigma \cos\lambda \cos\phi = (13.7\ \text{MPa})(\cos 45°)(\cos 54.74°) = 5.6\ \text{MPa} \blacktriangleleft$$

6.5.6 Maclado

Otro importante mecanismo por el que se puede producir la deformación plástica de los metales es el **maclado**. En este proceso, una parte de la red atómica se deforma de tal modo que genera una imagen especular de la red no deformada cercana (figura 6.37). El plano cristalográfico de simetría entre la parte deformada y la no deformada se denomina *plano de maclado*. El maclado, igual que el deslizamiento, tiene lugar en una dirección específica denominada *dirección de maclado*. Sin embargo, en el deslizamiento todos los átomos situados en uno de los lados del plano de deslizamiento se desplazan a igual distancia (figura 6.32), mientras que en el maclado los átomos se mueven a distancias proporcionales a su distancia al plano de maclado (figura 6.37). En la figura 6.38 se ilustran las diferencias básicas entre el deslizamiento y el maclado en la superficie de un metal deformado. El deslizamiento deja una serie de escalones (líneas) (figura 6.38*a*), mientras que el maclado deja pequeñas, pero bien definidas, regiones del cristal deformado (figura 6.38*b*). En la figura 6.39 se muestran algunas zonas de maclado sobre la superficie de titanio metálico.

Laboratorio virtual

En el maclado sólo se involucra una pequeña fracción del volumen total del cristal metálico, por tanto, la porción sobre la que puede producirse la deformación por maclado es pequeña. No obstante, el importante papel que juega el maclado en la de-

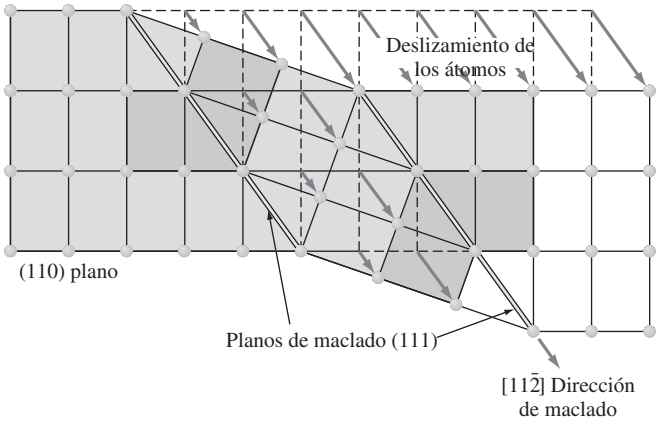


Figura 6.37
Diagrama esquemático del proceso de maclado en la red FCC.
(Según H. W. Hayden, W. G. Moffatt y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. III, Wiley, 1965, p. 111.)

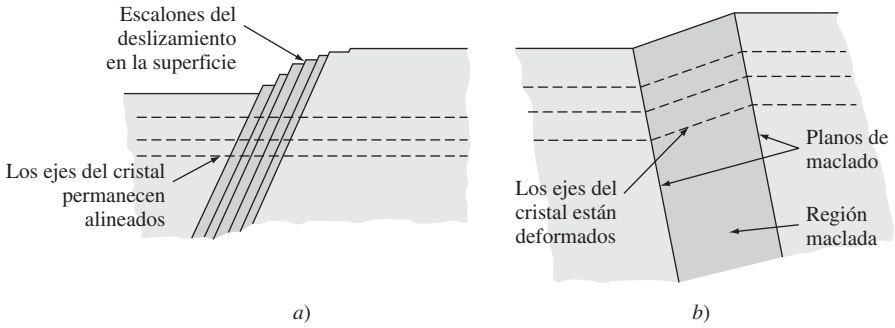


Figura 6.38
Diagrama esquemático de la superficie de un metal deformado después de *a*) deslizamiento y *b*) maclado.

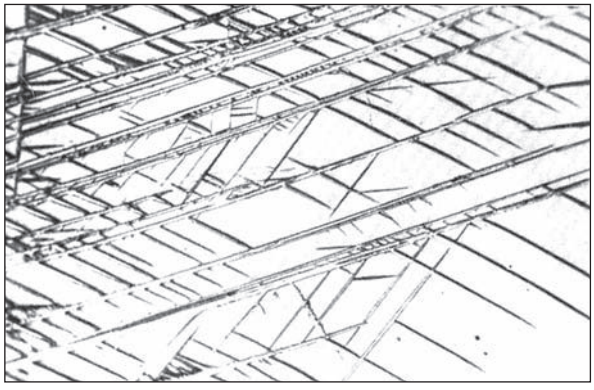


Figura 6.39
Maclas de deformación en un titanio puro (99.77%). (Ampliación 150×.)
[Según F. D. Rosi, C. A. Dube y B. H. Alexander, Trads. AIME, 197:259 (1953).]

formación estriba en que los cambios de orientación producidos por el maclado pueden orientar adecuadamente el nuevo sistema de deslizamiento respecto a la tensión de cizalladura permitiendo, así, que tenga lugar un deslizamiento adicional. De las tres estructuras cristalinas más usuales en metales (BCC, FCC y HCP), el maclado es el proceso más importante en la estructura HCP debido a su reducido número de sistemas de deslizamiento. No obstante, e incluso con la ayuda del maclado, metales HCP como el zinc y el magnesio son menos dúctiles que los metales con estructura BCC y FCC que tienen más sistemas de deslizamiento.

La deformación por maclado ha sido observada en metales HCP a temperatura ambiente y metales BCC tales como Fe, Mo, W, Ta y Cr deformados a muy baja temperatura. También se ha observado maclado en metales BCC a temperatura ambiente cuando han sido sometidos a una velocidad de deformación muy elevada. Los meta-

les FCC tienen menor tendencia a formar maclas de deformación, aunque en algunos metales FCC puede ocurrir la deformación por maclado si el nivel de tensión es lo bastante alto y la temperatura suficientemente baja.

Por ejemplo, cristales de cobre deformados a 4 K sometidos a elevadas tensiones pueden formar maclas de deformación.

6.6 DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE METALES POLICRISTALINOS

6.6.1 Efecto de los límites de grano sobre la resistencia de los metales

La mayoría de las aleaciones de interés en energía son policristalinas. Los monocristales de metal y aleaciones se utilizan principalmente en investigación y solamente en algunos casos tienen aplicaciones ingenieriles.[8] Los límites de grano aumentan la resistencia de los metales y aleaciones porque actúan como barreras del movimiento de dislocaciones, excepto a temperatura elevada, donde hacen las veces de regiones debilitadas. En general, a temperatura ambiente, los metales de grano fino son más sólidos, duros, resistentes y más susceptibles a endurecimiento por tensión. Sin embargo, son menos resistentes a la corrosión y termofluencia (deformación bajo carga constante a temperaturas elevadas; véase la sección 7.4). Un grano de tamaño fino también produce una conducta más uniforme e isotrópica de los materiales. En la sección 4.5, se expuso el número de tamaño de grano ASTM y un método para determinar el diámetro de grano medio de un metal aplicando técnicas de metalografía. Por consiguiente, para dos componentes fabricados con la misma aleación, el componente que tenga el número de tamaño de grano ASTM mayor o un diámetro de grano medio menor, será el más resistente. La relación entre resistencia y tamaño de grano es de suma importancia para los ingenieros. La famosa *ecuación de Hall-Petch*, ecuación 6.16, es una ecuación empírica (se basa en mediciones experimentales y no en la teoría) que relaciona la resistencia a la tracción de un metal σ_y con su diámetro medio d como sigue:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k/(d)^{1/2} \qquad \textbf{(6.16)}$$

donde σ_0 y k son constantes relacionadas con el material de interés. Existe un efecto similar entre la dureza (ensayo de microdureza de Vickers) y el tamaño de grano. La ecuación muestra claramente que a medida que disminuye el diámetro de grano, aumenta la resistencia a la tracción del material. Considerando que los diámetros de grano convencionales pueden variar de unos cuantos cientos de micras a unas cuantas micras, podría esperarse un cambio considerable en resistencia a través de la refinación de grano. En la tabla 6.5 se dan valores de σ_0 y k para materiales seleccionados. Es importante advertir que la ecuación de Hall-Petch no se aplica a 1) material muy tos-

[8] Se han desarrollado álabes de turbina monocristalinos destinados a turbinas de gas para evitar el agrietamiento en límite de grano a temperaturas y tensiones altas. Véase F. L. Ver Zinder y M. E. Shank, *Mater. Sci. Eng*., **6:**213-247(1970).

Tabla 6.5 Constantes de relación Hall-Petch para materiales seleccionados

	σ_0 (MPa)	k (MPa · $m^{1/2}$)
Cu	25	0.11
Ti	80	0.40
Acero dulce	70	0.74
Ni_3Al	300	1.70

Fuente: www.tf.uni-kiel.de/matwis/matv/pdf/chap_3_3.pdf

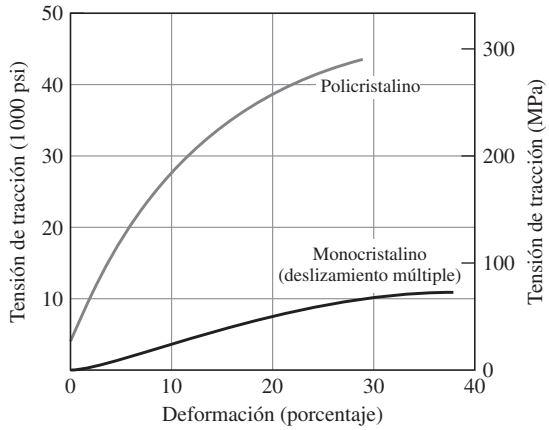


Figura 6.40
Curvas tensión-deformación para cobre monocristalino y policristalino. El monocristal está orientado a múltiples deslizamientos. El material policristalino muestra una mayor resistencia a cualquier grado de deformación.
(Según M. Eisenstadt, "Introduction to Mechanical Properties of Materials", Macmillan, 1971, p. 258.)

co ni a tamaños de grano extremadamente finos, y a 2) metales utilizados a temperaturas elevadas.

En la figura 6.40 se comparan las curvas tensión-deformación a la tracción de cobre puro monocristalino y policristalino a temperatura ambiente. En todos los valores de deformación, el cobre policristalino es más resistente que el cobre monocristalino. A 20 por ciento de deformación, la resistencia del cobre policristalino es 276 MPa (40 ksi) y 55 MPa (8 ksi) para el cobre monocristalino.

Durante la deformación plástica de metales, las dislocaciones que se mueven a lo largo de un determinado plano de deslizamiento no pueden seguir en línea recta al pasar de un grano a otro. Como se muestra en la figura 6.41, las líneas de deslizamiento cambian de dirección en los límites de grano. Por ello, cada grano tiene su propio conjunto de dislocaciones en sus propios planos de deslizamiento preferente, que tie-

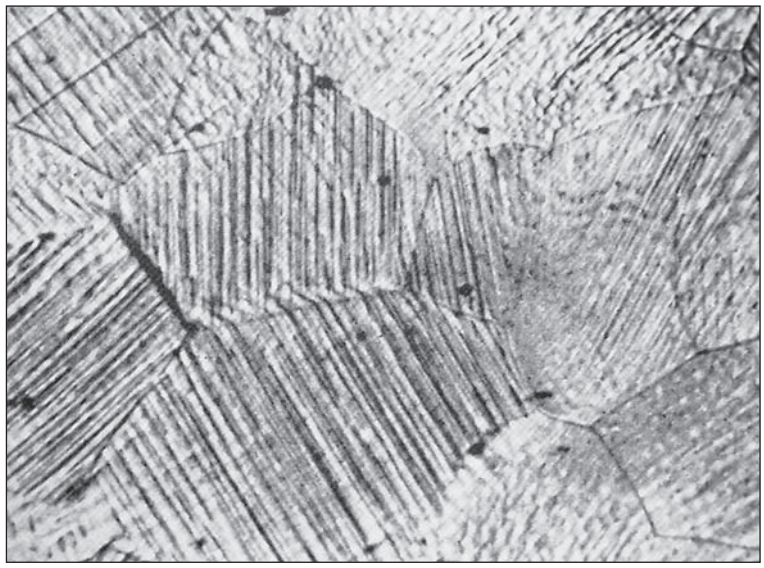


Figura 6.41
Aluminio policristalino deformado plásticamente. Nótese que las bandas de deslizamiento son paralelas en el interior del grano pero son discontinuas al cruzar el límite de grano. (Ampliación 60×.)
(Según G. C. Smith, S. Charter y S. Chiderley de la Universidad de Cambridge.)

nen una orientación distinta a la de los granos vecinos. A medida que aumenta el número de granos, disminuye el diámetro de grano, las dislocaciones dentro de cada grano pueden recorrer una distancia menor antes de que encuentren el límite de grano, punto en el cual culmina su movimiento (apilamiento de dislocación). Por esta razón, los materiales de grano fino poseen una mayor resistencia. En la figura 6.42 se muestra claramente cómo un límite de grano de ángulo abierto, que actúa como barrera al movimiento de las dislocaciones, ha ocasionado un apilamiento de dislocaciones en el límite de grano.

6.6.2 Efecto de la deformación plástica en la forma de los granos y en el ordenamiento de dislocaciones

Cambios en la forma del grano con la deformación plástica Considérese la deformación plástica de muestras reconocidas de cobre puro[9] con una estructura de granos equiaxiales. Durante la deformación plástica en frío, los granos son cizallados unos respecto a otros mediante la generación, movimiento y reordenación de dislocaciones. En la figura 6.43 se muestra la microestructura de dos chapas de cobre puro que han sido reducidas 30 y 50 por ciento, respectivamente, por laminación en frío.

[9]Las muestras en las condiciones recocidas han sido deformadas plásticamente y después sometidas de nuevo al calor en que se produce una estructura granular en la que los granos presentan dimensiones casi iguales en todas direcciones (equiaxiales).

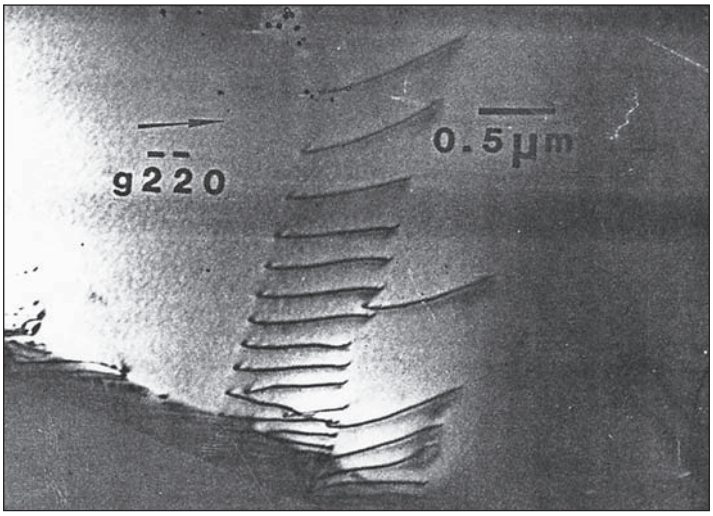
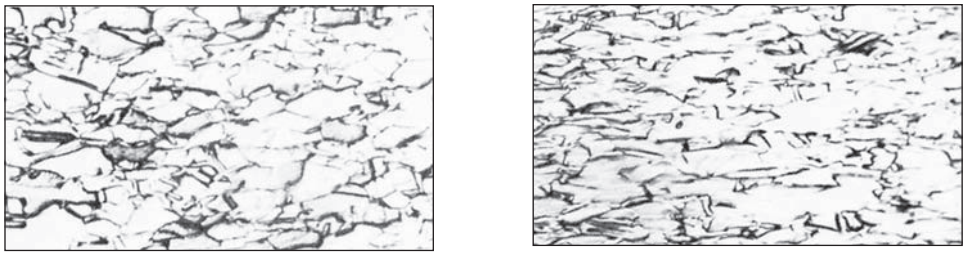


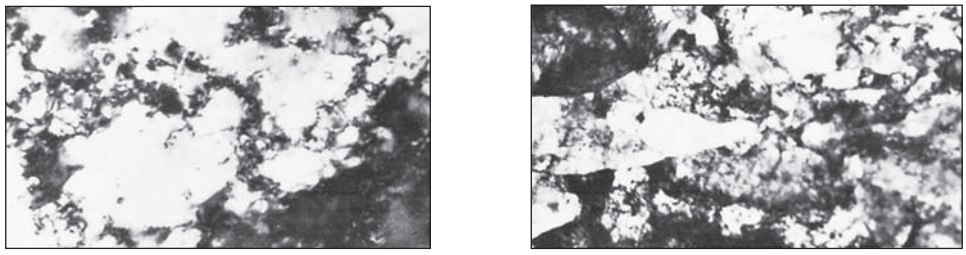
Figura 6.42
Apilamiento de dislocaciones contra el límite de grano en una chapa de acero inoxidable observada por microscopia electrónica de transmisión. (Ampliación 20 000×.)
[Según Z. Shen, R. H. Wagoner y W. A. T. Clark, Scripta Met., 20:926 (1986.)]



a) *b*)

Figura 6.43
Micrografías obtenidas mediante microscopio óptico, de las estructuras de deformación de una chapa de cobre puro que ha sido laminada en frío hasta reducciones de *a*) 30 por ciento y *b*) 50 por ciento. (Ataque: dicromato potásico; ampliación 300×.)
(Según J. E. Boyd en "Metals Handbook", vol. 8: "Metallography, Structures, and Phase Diagrams", 8a. ed., American Society for Metals, 1973, p. 221. ASM International.)

Nótese que al aumentar el grado de reducción por laminación en frío los granos son más alargados en la dirección de laminación como consecuencia del movimiento de las dislocaciones.



a) *b*)

Figura 6.44
Micrografías obtenidas por microscopia electrónica de transmisión de las estructuras de deformación de un cobre puro que ha sido laminado en frío hasta reducciones de *a*) 30 por ciento y *b*) 50 por ciento. Nótese que estas micrografías corresponden a las micrografías ópticas de la figura 6.43. (Muestras de transmisión, ampliación 30 000 ×.)
(Según J. E. Boyd en "Metals Handbook", vol. 8: "Metallography, Structures, and Phase Diagrams", 8a. ed., American Society for Metals, 1973, p. 221. ASM International.)

Cambios en la ordenación de las dislocaciones con la deformación plástica Las dislocaciones de la muestra de cobre puro con 30 por ciento de deformación forman una configuración celular con zonas claras en el centro de las celdas (figura 6.44*a*). Con el incremento de la deformación plástica en frío hasta 50 por ciento de la estructura de celdas se vuelve más densa y alargada en la dirección de la laminación (figura 6.44*b*).

6.6.3 Efecto de la deformación plástica en frío en el incremento de la resistencia de los metales

Como se muestra en las micrografías electrónicas de la figura 6.44, la densidad de dislocaciones aumenta con la deformación en frío. El mecanismo exacto por el que aumenta la densidad de dislocaciones por efecto del trabajo en frío no está completamente dilucidado pero durante la deformación en frío se crean nuevas dislocaciones que interactúan con las ya existentes. Puesto que la densidad de dislocaciones aumenta con la deformación, se hace más y más difícil el movimiento de las dislocaciones a través del "bosque de dislocaciones" existente y, por tanto, el metal se endurece con el aumento de la deformación en frío.

Cuando metales dúctiles como el cobre, aluminio y hierro α recocidos experimentan un trabajo en frío a temperatura ambiente, se endurecen por deformación debido a la interacción entre las dislocaciones antes descritas. En la figura 6.45 se muestra cómo el trabajo en frío a temperatura ambiente aumenta la resistencia a la tracción de un cobre puro desde 30 ksi (200 MPa) a 45 ksi (320 MPa) para 30 por ciento de trabajo frío. Por el contrario, se observa una disminución del alargamiento (ductilidad) asociado al aumento de la resistencia de tracción, como se muestra en la figura 6.45. Con 30 por ciento del trabajo frío, el alargamiento de cobre puro decrece desde 52 hasta 10 por ciento.

El *trabajo en frío* o el **endurecimiento por deformación** es uno de los métodos más importantes de endurecimiento de metales. Por ejemplo, el cobre y el aluminio puros sólo se pueden endurecer de forma significativa por este método. Así, mediante trefilado, puede fabricarse alambre de cobre puro con distinta resistencia mecánica (con ciertas limitaciones) variando la cantidad de endurecimiento por deformación.

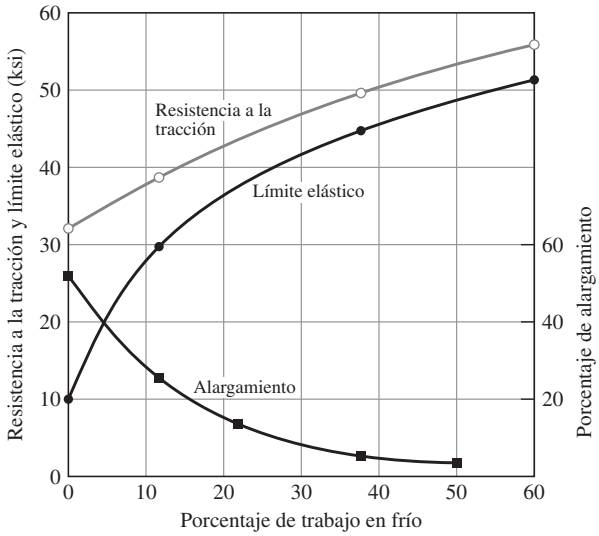


Figura 6.45
Porcentaje de trabajo en frío frente a la resistencia a la tracción y al alargamiento de un cobre puro libre de oxígeno. El trabajo en frío se expresa como el porcentaje de reducción del área de la sección transversal del metal deformado.

PROBLEMA DE EJEMPLO 6.10

Se desea producir una chapa de 0.040 pulgadas de espesor de cobre puro libre de oxígeno con una resistencia a la tracción de 45 ksi. ¿Qué porcentaje de trabajo en frío debe aplicarse al metal? ¿Cuál debería ser el espesor inicial de la chapa antes de la laminación en frío?

■ **Solución**

A partir de la figura 6.45 se deduce que el porcentaje de trabajo en frío debe ser de 25 por ciento. Por tanto, el espesor inicial debe ser:

$$\frac{x - 0.040\ \text{pulg}}{x} = 0.25$$

$$x = 0.053\ \text{pulg} \blacktriangleleft$$

6.7 ENDURECIMIENTO DE LOS METALES POR DISOLUCIÓN SÓLIDA

Además del trabajo en frío, el **endurecimiento por disolución sólida** también permite aumentar la resistencia de los metales. En este caso, la adición de uno o más elementos al metal puede aumentar la resistencia por la formación de una disolución sólida. La estructura de *disoluciones sólidas sustitucionales* y *soluciones intersticiales* ya ha sido discutida en la sección 4.3. Cuando los átomos sustitucionales (soluto) se mezclan en estado sólido con los átomos de otro metal (disolvente), se crean estados

de tensión alrededor de cada átomo de soluto. Estos estados de tensión interactúan con las dislocaciones y dificultan su movimiento, por lo que la disolución sólida es más resistente que el metal puro.

En el endurecimiento por disolución sólida hay dos factores importantes:

1. *Factor de tamaño relativo.* La diferencia entre el tamaño de los átomos del soluto y los del disolvente afecta al endurecimiento porque afecta a la distorsión de la red cristalina y la distorsión de la red dificulta el movimiento de las dislocaciones, es decir, endurece el metal.

2. *Orden a corto alcance.* Las disoluciones sólidas rara vez presentan una distribución aleatoria de los átomos que la constituyen; por el contrario, tienden a formar una cierta ordenación atómica de corto alcance. Como consecuencia, las diferentes estructuras de enlace impiden el movimiento de las dislocaciones.

Además de estos factores existen otros que también contribuyen al endurecimiento por disolución sólida, pero van más allá de los objetivos de este libro.

Como ejemplo de endurecimiento por disolución sólida se considera la aleación 70% Cu y 30% Zn en peso (latón de cartuchería). La resistencia a la tracción del cobre puro con 30% de trabajo en frío, es de 48 ksi (330 MPa), aproximadamente (figura 6.45). Sin embargo, la resistencia a la tracción de la aleación 70% Cu-30% Zn en peso con 30 por ciento de trabajo en frío, es de 72 ksi (500 MPa), aproximadamente. Por lo tanto, el endurecimiento por disolución sólida en este caso produce un incremento de la resistencia de alrededor de 24 ksi (165 MPa). Por otra parte, la ductilidad del cobre 30 por ciento de zinc se reduce de 65 a 10 por ciento después de 30 por ciento de trabajo en frío (figura 6.46).

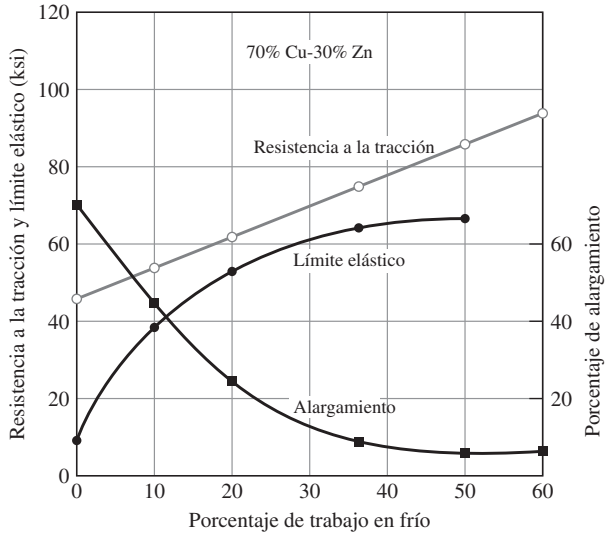


Figura 6.46
Porcentaje de trabajo en frío frente a la resistencia a la tracción y al alargamiento de la aleación 70% Cu-30% Zn en peso. El trabajo en frío se expresa como porcentaje de reducción del área de la sección transversal del metal deformado (véase ecuación 6.2).

6.8 RECUPERACIÓN Y RECRISTALIZACIÓN DE LOS METALES DEFORMADOS PLÁSTICAMENTE

El efecto de la deformación del plástico en las propiedades mecánicas y las características microestructurales de los metales se presentó en secciones anteriores de este texto. Durante el procesado y fabricación de metales y aleaciones, algunas veces es necesario tratar térmicamente el metal trabajado en frío para ablandarlo y aumentar así su ductilidad. Si la temperatura de tratamiento es lo bastante elevada durante un intervalo de tiempo suficiente, la estructura del metal trabajado en frío pasará a través de una serie de cambios denominados: 1) **recuperación**, 2) **recristalización** y 3) **crecimiento de grano**. En la figura 6.47 se muestran esquemáticamente dichos cambios estructurales al aumentar la temperatura del metal, además de los correspondientes cambios en las propiedades mecánicas. El tratamiento térmico que ablanda el metal trabajado en frío se denomina **recocido**, y se utilizan los términos de *recocido parcial* y *recocido total* para referirse a los grados de ablandamiento. Ahora se examinarán estos cambios estructurales con más detalle, comenzando con la estructura del metal fuertemente trabajado en frío.

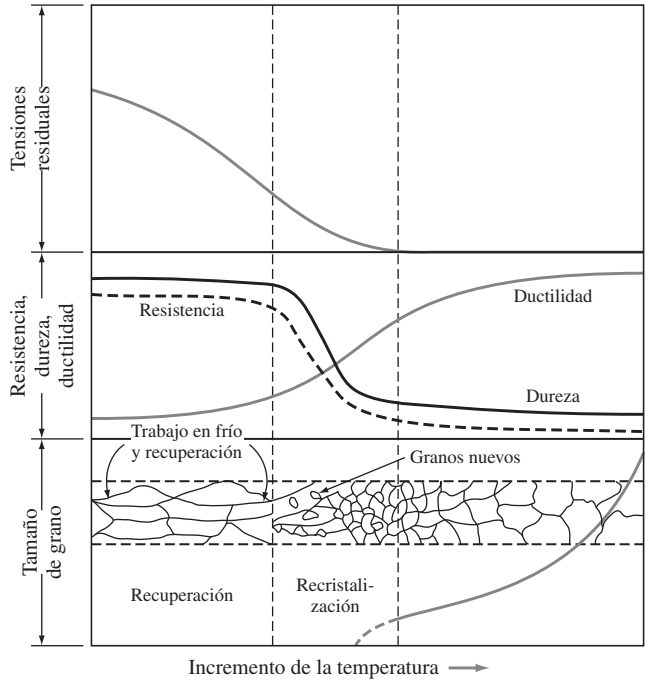
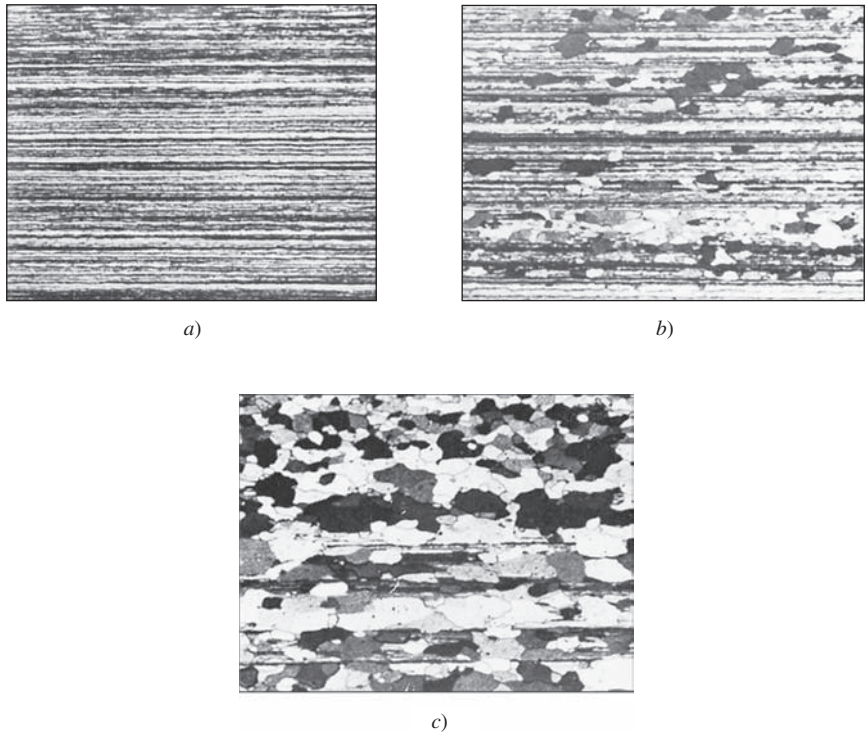


Figura 6.47
Efecto del recocido en los cambios sobre la estructura y las propiedades mecánicas de un metal trabajado en frío. *(Adaptado de Z. D. Jastrzebski, "The Nature and Properties of Engineering Materials", 2a. ed., Wiley, 1976, p. 228.)*

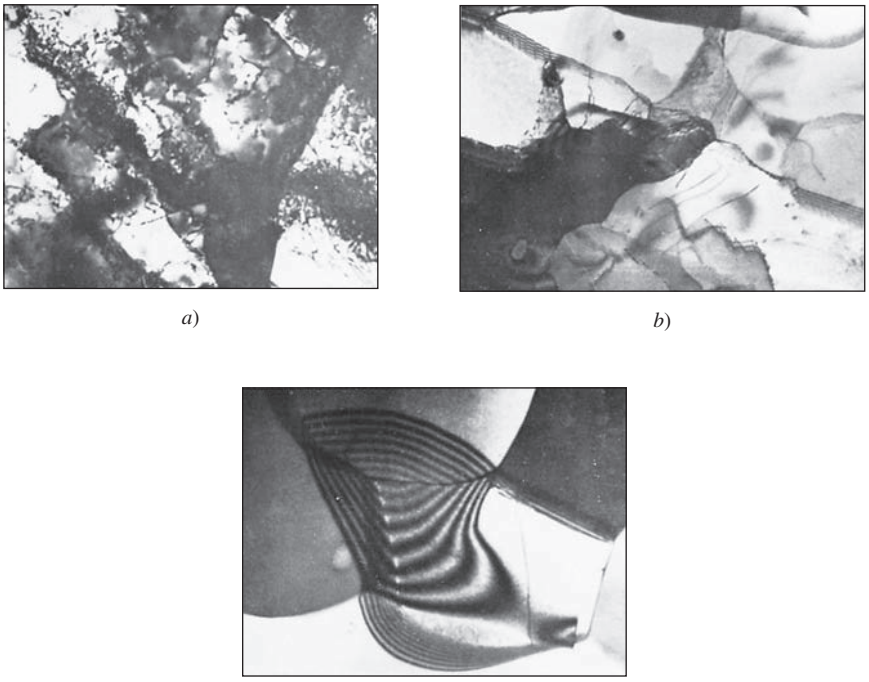
6.8.1 Estructura de un metal fuertemente deformado en frío antes del tratamiento térmico

Cuando un metal es fuertemente deformado en frío, mucha de la energía de deformación utilizada en la deformación plástica es almacenada en forma de dislocaciones y otras imperfecciones como defectos puntuales. Por ello, un metal endurecido por deformación tiene una energía interna mayor que un metal no deformado. En la figura 6.48*a* se muestra la microestructura (100×) de una lámina de aleación de Al-0.8% Mg trabajada en frío hasta 85 por ciento de reducción. Obsérvese que los granos están muy alargados en la dirección de laminación. Una micrografía obtenida por microscopia electrónica de transmisión (20 000×) (figura 6.49) muestra una estructura formada



a) *b*) *c*)

Figura 6.48
Lámina de aleación de aluminio 5657 (0.8% Mg) mostrando las microestructuras obtenidas después de la laminación en frío 85 por ciento de reducción y subsiguiente tratamiento térmico (micrografías obtenidas por microscopia óptica a 100× y con luz polarizada). *a*) Trabajado en frío de 85 por ciento; sección longitudinal. Los granos se encuentran fuertemente alargados. *b*) Trabajado en frío de 85 por ciento y tratamiento de relajación de tensiones a 302°C (575°F) durante 1 hora. Se observa el inicio de la recristalización que mejora la formación de la lámina y *c*) Trabajado en frío de 85 por ciento y recocido a 316°C (600°F) durante 1 hora. Se observa una estructura de granos recristalizados y de bandas de granos no cristalizados. *(Según "Metals Handbook", vol. 7, 8a. ed., American Society for Metals, 1972, p. 243. ASM International.)*



a) *b*) *c*)

Figura 6.49
Lámina de aleación de aluminio 5657 (0.8% Mg) mostrando las microestructuras obtenidas después de la laminación en frío 85 por ciento de reducción y subsiguiente tratamiento térmico. Las micrografías se obtuvieron por microscopia electrónica de transmisión. (Ampliación 20 000×.) *a*) La micrografía muestra enmarañamientos de dislocaciones y celdas (subgranos) generadas por el severo trabajo en frío. *b*) Después del trabajo en frío, la lámina se trató térmicamente para relajar tensiones a 302°C (575°F) durante 1 hora. La micrografía muestra las redes de dislocaciones y otros límites de grano de ángulo pequeño generados por poligonización. *c*) Después del trabajo en frío, la lámina se recoció a 316°C (600°F) durante 1 hora. La micrografía muestra la estructura recristalizada y un cierto crecimiento de subgranos.
(Según "Metals Handbook", vol. 7, 8a. ed., American Society for Metals, 1972, p. 243. ASM International.)

por una red celular con las paredes que presentan alta densidad de dislocaciones. Un metal altamente trabajado en frío tiene aproximadamente 10^{12} líneas de dislocación/cm^2.

6.8.2 Recuperación

Cuando un metal fuertemente deformado se calienta en el rango de temperatura de recuperación, justo debajo de la temperatura de recristalización, se relajan las tensiones

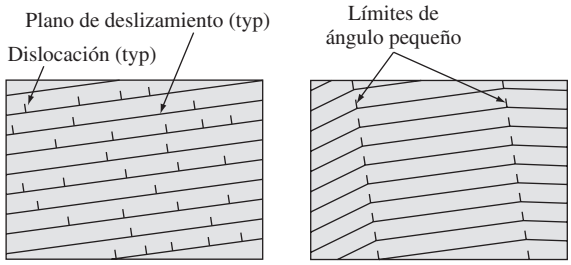


Figura 6.50
Representación esquemática de la poligonización de un metal deformado. *a*) Cristal de metal deformado mostrando el apilamiento de dislocaciones en los planos de deslizamiento. *b*) Después del tratamiento térmico de recuperación, las dislocaciones se reordenan para formar límites del grano de ángulo pequeño.
(Según L. E. Tanner e I. S. Servi, en "Metals Handbook", vol. 8, 8a. ed., American Society for Metals, 1973, p. 222.)

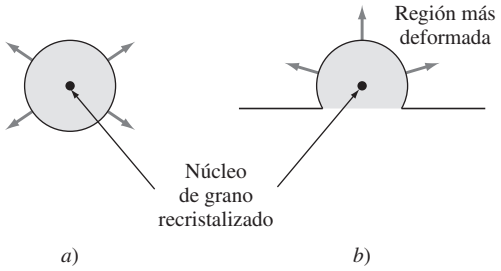


Figura 6.51
Modelo esquemático de crecimiento de un grano recristalizado durante la recristalización de un metal. *a*) Núcleo aislado expandiéndose por crecimiento de un grano deformado. *b*) Límite de grano de ángulo grande emigrando hacia una región del metal más deformada.

internas del metal (figura 6.47). Durante la recuperación, se suministra suficiente energía térmica como para permitir el reordenamiento de las dislocaciones en configuraciones de menor energía (figura 6.50). La recuperación de muchos metales trabajados en frío (por ejemplo, aluminio puro) genera una estructura de subgranos con límites de grano de ángulo pequeño, como se muestra en la figura 6.49*b*. El proceso de la recuperación se denomina *poligonización*, y frecuentemente es un cambio estructural que precede a la recristalización. La energía interna del metal recuperado es menor que la del estado de trabajado en frío, puesto que se aniquilan más dislocaciones o se transforman en configuraciones de menor energía mediante el proceso de recuperación. Durante este proceso, la resistencia de un metal trabajado en frío se reduce ligeramente, pero aumenta significativamente su ductilidad (figura 6.47).

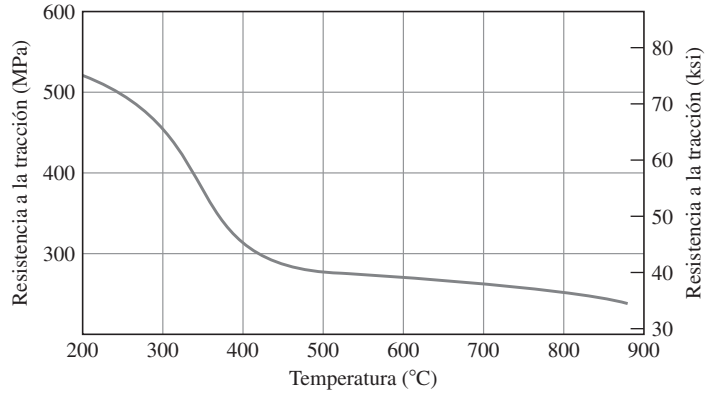
6.8.3 Recristalización

Cuando se calienta un metal trabajado en frío a una temperatura suficientemente alta, se nuclean nuevos granos libres de deformación en la estructura del metal recuperado, e inician su crecimiento (figura 6.48*b*), formando una estructura de material recristalizado. Después de suficiente tiempo a la temperatura a que tiene lugar la recristalización, la estructura de trabajado en frío se reemplaza completamente por una estructura de grano recristalizado, como se muestra en la figura 6.48*c*.

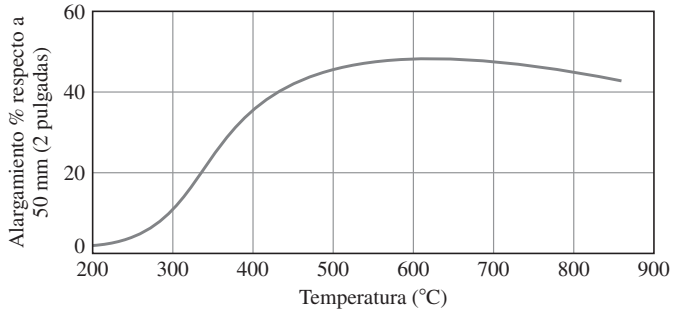
La recristalización tiene lugar a través de dos mecanismos principales: 1) un núcleo aislado puede expandirse con un grano deformado (figura 6.51*a*) o 2) un límite de grano de ángulo grande puede emigrar hacia una región fuertemente deformada del metal (figura 6.51*b*). En cada caso, la estructura del lado cóncavo de límite que se mueve está libre de deformación y tiene una energía interna relativamente baja, mientras que la estructura del lado convexo de la interfase que se mueve está altamente de-

formada con una gran densidad de dislocaciones y una elevada energía interna. El movimiento del límite de grano se produce, por tanto, lejos del centro de curvatura del citado límite. Por consiguiente, el crecimiento de un nuevo grano en expansión durante la recristalización primaria conduce a un descenso global de la energía interna del metal por la situación de regiones deformadas por regiones libres de deformación.

La resistencia a la tracción de un metal trabajado en frío disminuye de forma importante y su ductilidad aumenta mediante un tratamiento de recocido que produce una recristalización de la estructura del metal. Por ejemplo, la resistencia a la tracción de una lámina de 0.040 pulg (1 mm) del latón 85% Cu-15% Zn que ha sido laminado en frío hasta una reducción de 50 por ciento disminuyó de 75 a 45 ksi (520 a 310 MPa) por recocido de 1 hora a 400°C (figura 6.52*a*). Por otra parte, la ductilidad de la lámina aumentó de 3 a 38 por ciento mediante el tratamiento de recocido (figura 6.52*b*). En la figura 6.53*a* se muestra una imagen de unos hornos de recocido para bobina de



a)



b)

Figura 6.52
Efecto de la temperatura de recocido en *a*) la resistencia a la tracción y *b*) alargamiento de 50% de una lámina de 1 mm (0.040 pulgadas) de espesor de latón (85% Cu-15% Zn,) laminado en frío (el recocido fue de 1 hora).
(Según "Metals Handbook", vol. 2, 9a. ed., American Society for Metals, 1979, p. 320.)

Figura 6.53*a*
Hornos para el recocido de bobinas de láminas de acero. Las bobinas se sitúan bajo cubiertas cilíndricas y se coloca un horno encima de las bobinas. En este proceso de recocido, las bobinas se mantienen a una temperatura de 1 200 a 1 300°F (650 a 700°C) un tiempo medio de 26 horas. Durante el periodo de enfriamiento se proporciona una atmósfera controlada para proteger la superficie de las bobinas de acero.
(Cortesía de United Status Steel Corporation.)

acero (proceso en discontinuo). En la figura 6.53*b* se muestra un diagrama esquemático del proceso de recocido en continuo de lámina de acero y en la figura 6.53*c* se muestra una imagen de una línea de recocido en continuo.

Los factores importantes que afectan el proceso de recristalización en metales y aleaciones son 1) la cantidad de deformación previa del metal, 2) la temperatura, 3) el tiempo, 4) el tamaño de grano inicial y 5) la composición del metal o aleación. La recristalización de un metal puede tener lugar en un intervalo de temperaturas y este intervalo depende en cierta forma de las variables citadas. Por ello no puede hablarse de temperatura de recristalización de un metal en el mismo sentido que de temperatura

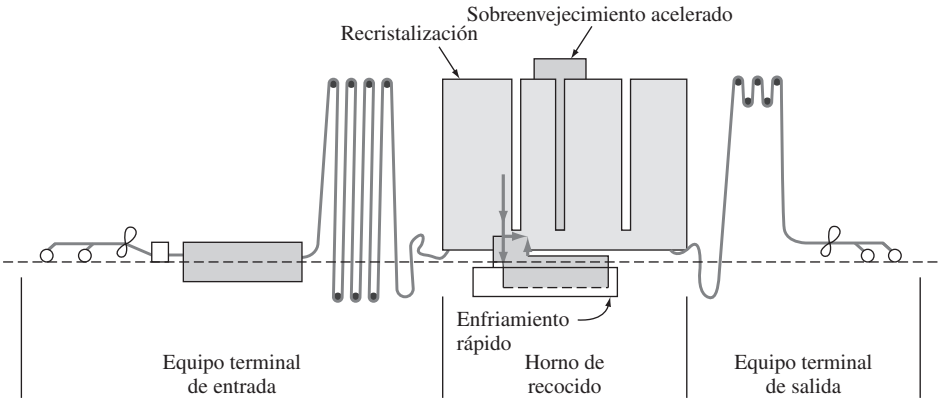


Figura 6.53*b*
Diagrama esquemático del recocido en continuo.
(Según W. L. Roberts, "Flat Processing of Steel", Marcel Deckker, 1988.)

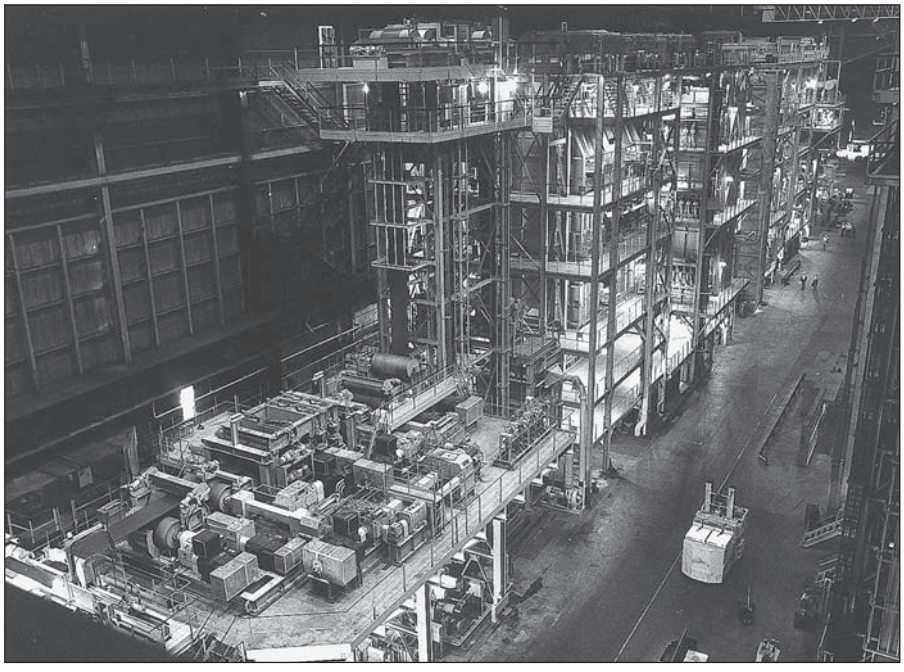


Figura 6.53*c*
Imagen de una línea de recocido en continuo para láminas de acero de bajo carbono.
(Cortesía de Bethlehem Steel Co.)

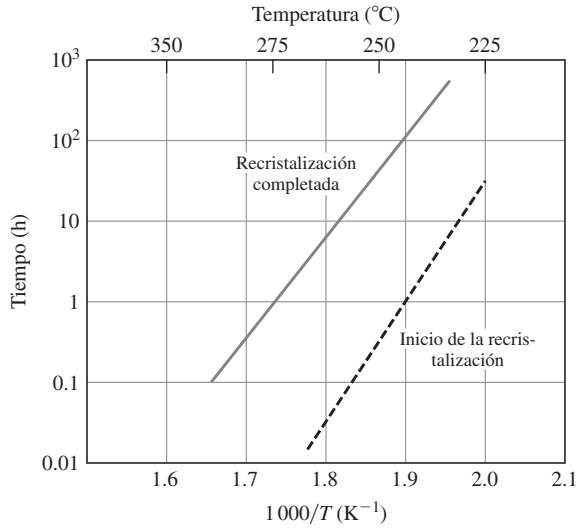


Figura 6.54
Relaciones tiempo-temperatura para la recristalización de aluminio de 99.0% deformado a 75 por ciento. La línea continua se corresponde con la recristalización completada y la lámina discontinua en el inicio de la recristalización. Este proceso de recristalización sigue una relación tipo Arrhenius de pulgadas respecto a $1/T(K^{-1})$ (véase sección 5.2).
(Según "Aluminum", vol. 1, American Society for Metals, 1967, p. 98.)

de fusión de un metal puro. Sobre los procesos de recristalización pueden hacerse las siguientes generalizaciones:

1. Se necesita una cantidad mínima de deformación para que sea posible la recristalización.

2. Cuanto menor sea el grado de deformación (por encima de un valor mínimo), mayor es la temperatura necesaria para producir la recristalización.

3. Aumentando la temperatura de recristalización disminuye el tiempo necesario para completarla (véase figura 6.54).

4. El tamaño de grano final depende principalmente del grado de deformación. A mayor grado de deformación menor será la temperatura de recocido para la recristalización y menor será el tamaño de grano recristalizado.

5. A mayor tamaño de grano inicial, mayor será la cantidad de deformación necesaria para producir una cantidad de recristalización equivalente.

6. La temperatura de recristalización disminuye al aumentar la pureza del metal. La adición de elementos en disolución sólida incrementa siempre la temperatura de recristalización.

PROBLEMA DE EJEMPLO 6.11

Si una pieza de cobre a 88°C tarda en recristalizar 9.0×10^3 minutos, y a 135°C, tarda 200 minutos, ¿cuál es la energía de activación del proceso, suponiendo que éste obedece la ecuación de Arrhenius y que el tiempo para recristalizar $= Ce^{-Q/RT}$, donde $R = 8.314$ J/(mol · K) y T está en kelvins?

■ **Solución**

$$t_1 = 9.0 \times 10^3 \text{ min}; T_1 = 88°\text{C} + 273 = 361 \text{ K}$$

$$t_2 = 200 \text{ min}; T_2 = 135°\text{C} + 273 = 408 \text{ K}$$

$$t_1 = Ce^{Q/RT_1} \quad \text{o} \quad 9.0 \times 10^3 \text{ mm} = Ce^{Q/R(361 \text{ K})} \tag{6.16}$$

$$t_2 = Ce^{Q/RT_2} \quad \text{o} \quad 200 \text{ min} = Ce^{Q/R(408 \text{ K})} \tag{6.17}$$

Dividiendo la ecuación 6.16 por la 6.17, resulta:

$$45 = \exp\left[\frac{Q}{8.314}\left(\frac{1}{361} - \frac{1}{408}\right)\right]$$

$$\ln 45 = \frac{Q}{8.314}(0.00277 - 0.00245) = 3.80$$

$$Q = \frac{3.80 \times 8.314}{0.000319} = 99\,038 \text{ J/mol o } 99.0 \text{ kJ/mol} \blacktriangleleft$$

6.9 SUPERPLASTICIDAD EN METALES

Un examen minucioso de la figura 6.25 muestra que la mayoría de los metales, incluso los que se clasifican de dúctiles, sufren una cantidad limitada de deformación plástica antes de la fractura. Por ejemplo, el acero dulce se alarga 22 por ciento antes de la fractura en ensayos tensiles uniaxiales. Como se expuso en la sección 6.2, muchas operaciones de conformado de metales se realizan a temperaturas elevadas con la finalidad de alcanzar un alto grado de deformación plástica mediante el aumento de la ductilidad del metal. La **superplasticidad** se refiere a la capacidad de algunas aleaciones metálicas, como algunas de aluminio y titanio, de deformarse hasta 2 000 por ciento a temperaturas elevadas y velocidades de carga bajas. Estas aleaciones no tienen una conducta superplástica cuando se cargan a temperaturas normales. Por ejemplo, una aleación de Ti recocido (6A1-4V) se alarga casi 12 por ciento antes de fracturarse en un ensayo tensil convencional a temperatura ambiente. La misma aleación, al ensayarse a temperaturas elevadas (840 a 870°C) y a velocidades de carga muy bajas ($1.3 \times 10^{-4}\,\text{s}^{-1}$) puede alargarse desde 750 hasta 1 170 por ciento. Para alcanzar la superplasticidad, tanto el material como el proceso de carga deben cumplir determinadas condiciones:

1. El material debe tener un tamaño de grano muy fino (5-10 μm) y ser muy sensible a la velocidad de deformación.

2. Es necesaria una temperatura de carga alta mayor de 50 por ciento de la temperatura de fusión del metal.

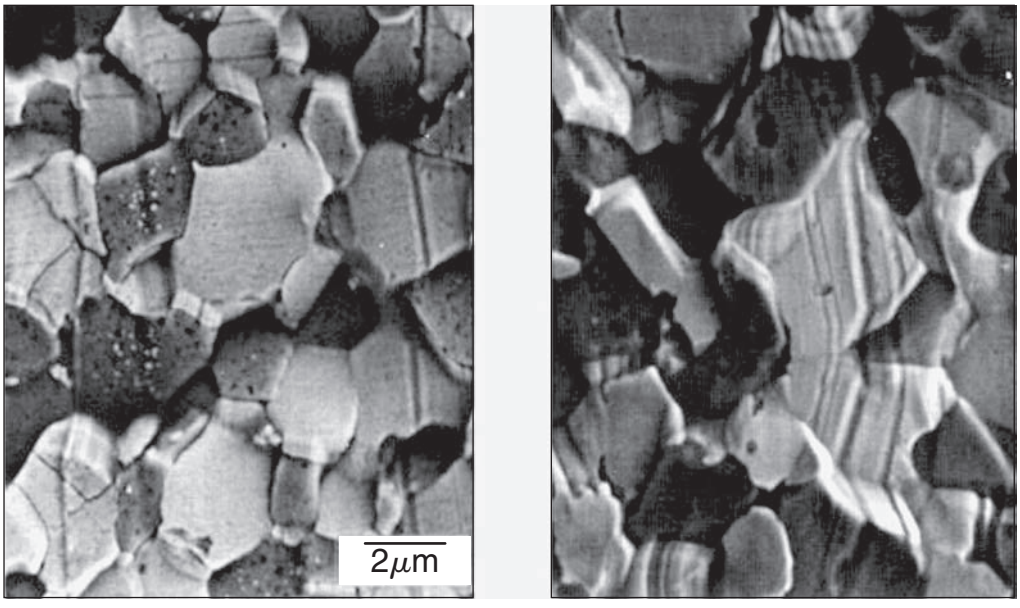
3. Es necesario una velocidad de deformación baja y regulada dentro del intervalo de 0.01 a 0.0001 s^{-1}.[10]

[10]Se ha informado de superplasticidad con velocidad de deformación alta ($>10^{-2}\,\text{s}^{-1}$) en algunas aleaciones de aluminio.

Para muchos materiales estos requisitos no son fáciles de alcanzar y, por tanto, no todos pueden lograr una conducta superplástica. En la mayoría de los casos, la condición 1) es muy difícil de lograr, esto es, el tamaño de grano ultrafino.[11]

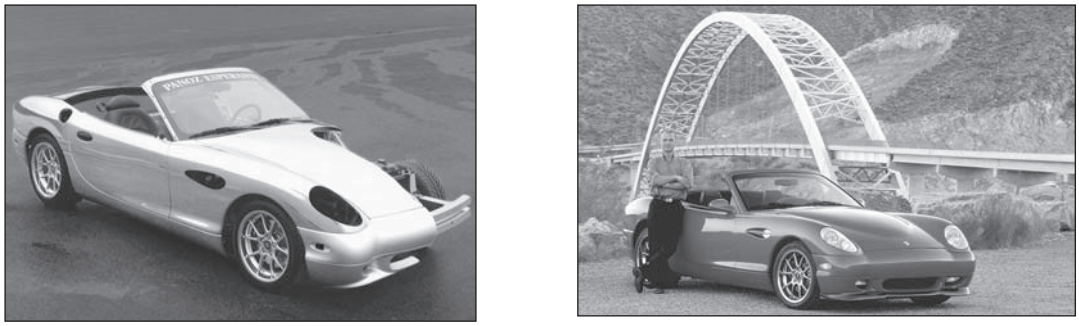
La conducta superplástica es una propiedad muy útil para fabricar componentes estructurales complejos. La pregunta es: "¿Qué mecanismo de deformación da cuenta de este increíble nivel de deformación plástica?" En secciones anteriores se discutió el papel de las dislocaciones y sus movimientos sobre la conducta de materiales bajo carga a temperatura ambiente. A medida que las dislocaciones atraviesan el grano, se produce la deformación plástica. Pero conforme el tamaño de grano disminuye, el movimiento de las dislocaciones se vuelve más limitado y el material se vuelve más resistente. Sin embargo, el análisis metalográfico de los materiales que presentan conducta superplástica ha revelado una actividad de dislocación muy limitada dentro del grano. Esto respalda el hecho de que los materiales superplásticos son susceptibles de otros mecanismos de deformación como deslizamiento y difusión de límite de grano. Se piensa que a elevadas temperaturas se acumula una gran cantidad de deformación debido al deslizamiento y rotación de granos o grupos de granos entre sí. También existe la idea de que el deslizamiento del límite de grano se acomoda mediante el cambio gradual de la forma de grano a medida que la materia se mueve por la difusión a través del límite de grano. En la figura 6.55 se muestra la microestructura de la alea-

[11]La recristalización estática y dinámica, la aleación mecánica y otras técnicas se aplican para crear estructuras de grano ultrafinas.



a) *b*)

Figura 6.55
Deformación superplástica en aleación eutéctica de Pb-Sn *a*) antes y *b*) después de la deformación.



a) *b*)

Figura 6.56
Capó para automóvil fabricado en aluminio superplástico aplicando el método de moldeo por soplado.
(Por cortesía de Panoz Auto.)

ción eutéctica de Pb-Sn antes (figura 6.55*a*) y después de deformación superplástica (figura 6.55*b*). Queda claro a partir de la figura que los granos son equiaxiales antes y después de la deformación; pueden advertirse el deslizamiento y la rotación de los granos.

Existen muchos procesos de fabricación que aprovechan la conducta superplástica de los materiales para producir componentes complejos. El conformado por soplado es uno de esos procesos en los que se fuerza a un material superplástico a deformarse bajo presión de gas y tomar la forma de un troquel. En la figura 6.56 se muestra el capó de un automóvil fabricado con una aleación de aluminio formada superplásticamente, mediante la aplicación del método de moldeo por soplado. Además, la conducta superplástica se puede combinar con enlace por difusión (un método para unir metales) para producir componentes estructurales con un desperdicio limitado de material.

6.10 METALES NANOCRISTALINOS

En el capítulo 1, se introdujo el concepto de nanotecnología y materiales nanoestructurados. Cualquier material cuya escala de longitud es menor de 100 nm se clasifica como *nanoestructurado*. De acuerdo con esta definición, todos los metales con diámetros medios de grano menores de 100 nm se consideran nanoestructurados o nanocristalinos. La pregunta es: "¿Cuáles son las ventajas de los **metales nanocristalinos**?" Los metalúrgicos siempre han estado conscientes de que al reducir el tamaño de grano puede producirse un metal más duro, sólido y resistente, como lo demuestra la ecuación de Hall-Petch (6.16). Como se expuso en la sección anterior, también se sabe que en los niveles de tamaño de grano ultrafino (no necesariamente nanocristalino) y bajo determinadas condiciones de temperatura y velocidad de carga, algunos materiales pueden sufrir una deformación plástica de muchas veces sus niveles convencionales, esto es, alcanzan la superplasticidad.

Teniendo en mente las características atribuidas a los tamaños de grano ultrafinos y extrapolando la ecuación de Hall-Petch para metales nanocristalinos, se pueden prever posibilidades extraordinarias. Considérese la posibilidad de que, en virtud de la ecuación de Hall-Petch, si el diámetro medio de grano de un metal disminuye de

10 μm a 10 nm, la resistencia a la tracción aumentará en un factor de 31. ¿Es esto posible? ¿Cómo afectan los nanogranos la ductilidad, resistencia, fatiga y termofluencia de los metales? ¿Cómo se pueden producir metales a granel de estructura nanocristalina? Estas preguntas y otras similares son el motor en la investigación y desarrollo en el campo de los metales nanocristalinos, Por tanto, por lo menos en las industrias de fabricación de metales, se conocen desde hace muchas décadas las posibilidades para mejorar las propiedades con un menor tamaño de grano o mediante la dispersión de nanofases secundarias. La dificultad ha estribado en la invención de técnicas de conformado de metales que puedan producir metales verdaderamente nanocristalinos ($d < 100$ nm). En las últimas décadas, se han inventado nuevas técnicas para producir tales materiales y se han mejorado las técnicas anteriores. Así, hay entusiasmo entre quienes estudian estos materiales. Debe mencionarse, sin embargo, que incluso después de décadas de investigación muchas preguntas aún no se responden y deben realizarse investigaciones importantes para procesar, caracterizar y evaluar estos materiales en cuanto a sus aplicaciones prácticas.

Se ha informado que el módulo de elasticidad de los materiales nanocristalinos es comparable a los materiales microcristalinos a granel en cuanto a tamaños de grano mayores de 5 nm. Para d menor de 5 nm, se ha informado una disminución en el módulo de elasticidad de metales, por ejemplo, el hierro nanocristalino. No queda del todo claro por qué ocurre una caída así en el módulo de elasticidad; quizá pueda hallarse la razón al tomarse en cuenta que para dichos granos pequeños la mayoría de los átomos están situados en la superficie del grano (a diferencia del interior del grano) y, por consiguiente, a lo largo del límite de grano. Esto es totalmente contrario a lo que se encuentra en los materiales nanocristalinos.

Como se expuso anteriormente, la dureza y resistencia de los materiales aumenta con una disminución del tamaño de grano. Este aumento de dureza y resistencia se debe al apilamiento por dislocación y a la obstaculización del movimiento de dislocación para granos convencionales. Para materiales nanocristalinos, la mayoría de los datos disponibles se basan en valores de dureza obtenidos en ensayos de nanodureza. Ello se debe en su mayoría a la dificultad de obtener especímenes tensiles con estructura nanocristalina. Pero dado que la resistencia y la dureza están estrechamente correlacionadas, los ensayos de nanodureza son aceptables en este momento. Se ha determinado que a medida que disminuye el tamaño de grano a alrededor de 10 nm, la dureza aumenta por un factor de cuatro a seis para el cobre nanocristalino, y de seis a ocho para el níquel nanocristalino en comparación con metales de grano grande ($d > 1$ μm). Aunque éste es un aumento impresionante, sigue siendo muchísimo menor a la predicción de la ecuación de Hall-Petch. Además, hay datos publicados que indican un "efecto Hall-Petch negativo" en el tamaño de grano más fino ($d < 30$ nm), lo cual indica que hay en funcionamiento un mecanismo suavizante. Algunos investigadores piensan que es del todo posible que a niveles de grano tan pequeños, el concepto de una dislocación móvil o de apilamiento por dislocación ya no sea aplicable y que otros mecanismos, como el deslizamiento, la difusión, etc., del límite de grano, estén operando.

Se han presentado argumentos en el sentido de que en el intervalo superior nanocristalino (50 nm $< d <$ 100 nm), las actividades relacionadas con la dislocación similares a las observadas en metales microcristalinos dominan, mientras que en el intervalo inferior nanocristalino ($d < 50$ nm) la actividad de dislocación (formación y movimiento) disminuye considerablemente. Las tensiones necesarias para activar las

fuentes de dislocación son extremadamente altas a dichos tamaños de grano pequeños. Se han realizado algunos estudios HRTEM *in situ* que respaldan este argumento. Finalmente, aún no se han comprendido bien los mecanismos de fortalecimiento y deformación de los materiales nanocristalinos, y hace falta más investigación teórica y experimental. En el siguiente capítulo se expondrán las características de ductilidad y resistencia de estos materiales.

6.11 RESUMEN

Los metales y aleaciones se procesan hasta obtener distintas formas mediante varios métodos de fabricación. Algunos de los procesos industriales más importantes son: fundición, laminación, extrusión, trefilado y embutición.

Cuando se aplica una tensión uniaxial a una barra de metal, el metal primero se deforma elásticamente y después plásticamente ocasionando una deformación permanente. En muchos diseños ingenieriles es necesario conocer el límite elástico convencional de 0.2 por ciento, la resistencia a la tracción y el alargamiento (ductilidad) de un metal o aleación. Estas magnitudes se obtienen del diagrama tensión-deformación convencionales derivado del ensayo de tracción. La dureza de un metal también puede tener interés. En la industria, las escalas de dureza habituales son la escala Rockwell B y C y la escala Brinell (BHN).

El tamaño de grano tiene repercusiones directas en las propiedades de un metal. Los metales con tamaño de grano fino son más resistentes y tienen propiedades más uniformes. La resistencia del metal se relaciona con su tamaño de grano por medio de una relación empírica llamada ecuación de Hall-Petch. Se espera que los metales con tamaño de grano que se ubican en el intervalo nano (metales nanocristalinos) tengan resistencia y dureza ultraaltas, según lo predice la ecuación de Hall-Petech.

Cuando un metal se deforma plásticamente mediante conformado en frío, el metal se endurece por deformación y, como resultado, aumenta su resistencia y disminuye su ductilidad. El endurecimiento por deformación puede eliminarse dando al metal un tratamiento de recocido térmico. Cuando el metal se endurece por deformación y se calienta lentamente a una temperatura alta por debajo de su temperatura de fusión, ocurren los procesos de recuperación, de recristalización y de crecimiento de grano y el metal se suaviza. Al combinar el endurecimiento por deformación y el recocido pueden lograrse reducciones de grandes espesores de cortes de metal sin fracturas.

Al deformar algunos metales a alta temperatura y reducir las velocidades de carga, es posible alcanzar la superplasticidad, esto es, la deformación del orden de 1 000 a 2 000%. Para alcanzar la superplasticidad el tamaño de grano debe ser ultrafino.

La deformación plástica de los metales básicamente tiene lugar por un proceso de deslizamiento que supone el movimiento de dislocaciones. El deslizamiento normalmente tiene lugar en los planos de una máxima capacidad y en las direcciones de máxima compactibilidad. La combinación de un plano de deslizamiento y de una dirección de deslizamiento constituye un sistema de deslizamiento. Los metales con un gran número de sistemas de deslizamiento son más dúctiles que los metales con pocos sistemas de deslizamiento. Muchos metales se deforman por maclado cuando el deslizamiento es difícil.

Los límites de grano normalmente endurecen los metales a baja temperatura porque actúan como barreras al movimiento de dislocaciones. Sin embargo, bajo ciertas condiciones de deformación a alta temperatura, los límites de grano actúan como regiones débiles debido al deslizamiento del límite de grano.

6.12 DEFINICIONES

Sección 6.1

Trabajo en caliente de metales: deformación permanente de metales y aleaciones por encima de la temperatura a la que se produce continuamente una microestructura sin deformación (temperatura de recristalización).

Trabajo en frío de metales: deformación permanente de metales y aleaciones por debajo de la temperatura a la que se produce una microestructura sin deformación (temperatura de recristalización). El trabajo en frío produce el endurecimiento por deformación del metal.

Porcentaje de reducción en frío:

$$\%\text{ de reducción en frío} = \frac{\text{cambio en el área de la sección transversal}}{\text{área original de la sección transversal}} \times 100\%$$

Recocido: tratamiento térmico aplicado a los metales para reblandecerlos.

Extrusión: proceso de conformado plástico por el que un metal produce su sección transversal cuando se le fuerza a pasar a través de una matriz mediante una presión elevada.

Forja: proceso primario de conformado por el que un metal adopta una forma útil cuando es martilleado o sometido a presión.

Trefilado: proceso por el que una varilla o cable reduce su sección cuando pasa a través de una o varias matrices cónicas al ser estirado desde el otro extremo.

Sección 6.2

Deformación elástica: se dice que un metal ha sido deformado elásticamente si vuelve a sus dimensiones originales después de eliminar la fuerza que causó la deformación.

Tensión convencional σ: fuerza axial media dividida por el área de la sección transversal original ($\sigma = F/A_0$).

Deformación convencional ϵ: cambio en la longitud de una muestra dividida por su longitud inicial ($\epsilon = \Delta l/l_0$).

Tensión de cizalladura τ: fuerza de cizalladura S dividida por el área A sobre la que actúa dicha fuerza ($\tau = S/A$).

Deformación de cizalladura γ: desplazamiento de cizalladura a dividido por la distancia h a la que actúa la cizalla. ($\gamma = a/h$).

Sección 6.3

Diagrama de tensión-deformación convencional: gráfica experimental de la tensión convencional frente a la deformación convencional; normalmente se representa con σ como eje y y ϵ como eje x.

Módulo de elasticidad E: tensión dividida por deformación (σ/ϵ) en la región elástica de un diagrama tensión-deformación convencional de un metal ($E = \sigma/\epsilon$).

Límite elástico: tensión a la que se produce una deformación específica en un ensayo de tracción técnico. En Estados Unidos el límite elástico se determina a 0.2 por ciento de deformación.

Resistencia a la tracción (UTS): valor máximo de tensión en el diagrama tensión-deformación convencional.

Sección 6.4

Dureza: medida de la resistencia de un material a la deformación permanente.

Sección 6.5

Deslizamiento: movimiento relativo de unos átomos sobre otros durante la deformación permanente de un metal.

Bandas de deslizamiento: líneas marcadas sobre la superficie de un metal debidas a la deformación permanente por deslizamiento.

Sistema de deslizamiento: combinación de un plano de deslizamiento y una dirección de deslizamiento.

Deformación por maclado: proceso de deformación plástica que ocurre en algunos metales y bajo ciertas condiciones. En este proceso, un gran grupo de átomos se desplaza a la vez para formar una región de la red cristalina que es la imagen especular de una zona similar a lo largo de un plano de maclado.

Sección 6.6

Relación Hall-Petch: una ecuación empírica que relaciona la fuerza del metal con el tamaño de sus granos.

Endurecimiento por deformación: endurecimiento de un metal o aleación por trabajo en frío. Durante el trabajo en frío se multiplican e interactúan las dislocaciones ocasionando un aumento de la resistencia del metal.

Sección 6.7

Endurecimiento por disolución sólida: endurecimiento de un metal por adición de elementos de aleación que forman disoluciones sólidas. En este caso, las dislocaciones tienen mayor dificultad de movimiento a través de la red metálica debido a la diferencia de tamaño y características eléctricas de los átomos presentes.

Sección 6.8

Recocido: proceso de tratamiento por calor aplicado a un metal trabajado en frío para suavizarlo.

Recuperación: primera etapa del proceso de recocido que da por resultado la eliminación de tensiones residuales y la formación de configuraciones de dislocación de baja energía.

Recristalización: segunda etapa del proceso de recocido en el que granos nuevos comienzan a crecer y la densidad de dislocación disminuye considerablemente.

Crecimiento de grano: tercera etapa en la que granos nuevos empiezan a crecer de forma equiaxial.

Sección 6.9

Superplasticidad: capacidad de algunos metales para deformarse plásticamente de 1 000 a 2 000% a altas temperaturas y velocidades de carga bajas.

Sección 6.10

Metales nanocristalinos: metales con tamaño de grano menor de 100 nm.

6.13 PROBLEMAS

Las respuestas a los problemas marcados con asterisco, se encuentran al final del libro.

6.1 ¿Cómo se fabrican las aleaciones metálicas mediante los procesos de fundición?

6.2 Distinga entre productos de forja y productos de fundición.

6.3 ¿Por qué los lingotes de fundición primero se laminan en caliente en lugar de hacerlo en frío?

6.4 ¿Qué tipo de tratamiento se aplica a una chapa de metal después de laminarla en caliente y en "tibio"? ¿Con qué intención?

6.5 Calcule el porcentaje de reducción en frío después de la laminación de una chapa desde 0.40 pulgadas de espesor hasta 0.025 pulgadas.

***6.6** Una chapa de latón con 70% Cu-30% Zn de 0.0955 cm de espesor se lamina en frío hasta reducir 30 por ciento el espesor. ¿Cuál será el espesor final de la chapa?

6.7 Una chapa de aleación de aluminio se lamina en frío 30 por ciento hasta un espesor de 0.080 pulgadas. Si se lamina de nuevo en frío hasta un espesor final de 0.064 pulgadas, ¿cuál será el trabajo en frío total aplicado?

6.8 Describa e ilustre los siguientes procesos de extrusión: *a*) extrusión directa y *b*) extrusión indirecta. ¿Cuál es la ventaja de cada proceso?

6.9 ¿Qué proceso del problema de ejemplo 6.8 se usa comúnmente? ¿Qué metales o aleaciones suelen extruirse?

6.10 Describa los procesos de forja. ¿Qué diferencia hay entre la forja a martillo y la forja con prensa?

6.11 ¿Cuál es la diferencia entre forja con matriz abierta y forja con matriz cerrada? Ilustre. Dé un ejemplo de un producto metálico producido para cada proceso.

6.12 Describa el proceso de trefilado. ¿Por qué es necesario asegurar la limpieza y lubricación adecuadas del alambre durante el trefilado?

***6.13** Calcule el porcentaje de reducción en frío cuando se trefila un alambre de aluminio desde 5.25 mm hasta 2.30 mm de diámetro.

***6.14** Un alambre de 99.5 por ciento de cobre y 0.15 pulgadas de diámetro se trefila en frío con 30 por ciento de reducción. ¿Cuál será el diámetro final del alambre?

6.15 Un alambre de latón se trefila en frío 25 por ciento hasta un diámetro de 1.10 mm, y se trefila de nuevo hasta 0.900 mm. ¿Cuál será el porcentaje total de reducción?

6.16 Distinga entre deformación elástica y plástica.

6.17 Defina tensión convencional. ¿Qué unidades se utilizan comúnmente en Estados Unidos y en el SI de unidades?

6.18 Calcule la tensión convencional en el SI de unidades aplicadas sobre una barra de 2.00 cm de diámetro que soporta una carga de 1 300 kg.

***6.19** Calcule la tensión convencional en el SI de unidades que actúa en un pasamanos de 15 cm de longitud y una sección transversal de 4.25 mm $\times$ 12.0 mm que soporta una carga de 5 000 kg.

***6.20** Calcule la tensión convencional en el SI de unidades que actúa sobre un pasamanos de 25 cm de longitud y una sección transversal de 9.00 mm $\times$ 4.00 mm que soporta una carga de 3 500 kg.

6.21 Calcule la tensión convencional en unidades de Estados Unidos que actúa sobre barra redonda de 0.400 pulgadas de diámetro que soporta una fuerza de 1 500 lb.

6.22 ¿Cuál es la relación entre deformación convencional y porcentaje de alargamiento?

***6.23** Una probeta de tracción de latón de cartuchería tiene una sección transversal de 0.320 pulgadas $\times$ 0.120 pulgadas y una longitud de calibración de 2.00 pulgadas. Calcule la deformación convencional ocurrida durante el ensayo si la distancia final ocurre entre marcas de 2.35 pulgadas.

6.24 Una barra redonda de 0.505 pulgadas de diámetro de una aleación de aluminio se ensaya a tracción hasta la fractura. Si el diámetro final de la zona de fractura es de 0.440 pulgadas ¿cuál será la estricción de la muestra?

6.25 Se obtuvieron los siguientes datos de tensión-deformación en un acero con 0.2% de carbono. *a*) Dibuje la curva tensión-deformación. *b*) Determine la resistencia a la tracción del acero. *c*) Determine el porcentaje de alargamiento a fractura.

Tensión convencional (ksi)	Deformación convencional (pulgadas/pulgadas)	Tensión convencional (ksi)	Deformación convencional (pulgadas/pulgadas)
0	0	76	0.08
30	0.001	75	0.10
55	0.002	73	0.12
60	0.005	69	0.14
68	0.01	65	0.16
72	0.02	56	0.18
74	0.04	51	(Fractura) 0.19
75	0.06		

6.26 Dibuje los datos del problema de ejemplo 6.25 como tensión convencional (MPa) frente a deformación convencional (mm/mm) y determine la resistencia a la tracción del acero.

6.27 Se obtuvieron los siguientes datos de tensión-deformación al inicio de un ensayo de tracción de un acero con 0.2% de carbono. *a*) Con estos datos, dibuje la correspondiente curva tensión-deformación convencional. *b*) Determine el límite elástico de 0.2 por ciento de este acero. *c*) Determine el módulo de elasticidad de este acero. (Nótese que estos datos sólo corresponden a la parte inicial de la curva tensión deformación.)

Tensión convencional (ksi)	Deformación convencional (pulgadas/pulgadas)	Tensión convencional (ksi)	Deformación convencional (pulgadas/pulgadas)
0	0	60	0.0035
15	0.0005	66	0.004
30	0.001	70	0.006
40	0.0015	72	0.008
50	0.0020		

6.28 Dibuje los datos del problema de ejemplo 6.27 como tensión convencional (MPa) frente a deformación convencional (mm/mm) y determine el límite elástico de 0.2 por ciento del acero.

***6.29** Una barra de 0.505 pulgadas de diámetro de una aleación de aluminio se somete a una carga de 25 000 lb. Si el diámetro de la barra es de 0.490 pulgadas a esta carga, determine *a*) la tensión y la deformación convencionales y *b*) la tensión y deformación reales.

6.30 Una barra de 20 cm de longitud y 0.250 cm de diámetro está cargada con 5 000 N de peso. Si el diámetro decrece hasta 0.210 cm, determine *a*) la tensión y la deformación convencionales a esta carga y *b*) la tensión y la deformación reales a esta carga.

6.31 Defina la dureza de un metal.

6.32 ¿Cómo se determina la dureza de un material mediante un durómetro?

6.33 ¿Qué tipo de penetradores se utilizan en *a*) el ensayo de dureza Brinell, *b*) dureza Rockwell C y *c*) dureza Rockwell B?

6.34 ¿Qué son las bandas de deslizamiento y las líneas de deslizamiento? ¿Qué causa la formación de las bandas de deslizamiento en la superficie del metal?

6.35 Describa el mecanismo de deslizamiento que permite que un metal se deforme plásticamente sin llegar a la fractura.

6.36 ¿Por qué se produce usualmente el deslizamiento en metales en los planos de máxima compactibilidad?

6.37 ¿Por qué usualmente se produce el deslizamiento en las direcciones de máxima capacidad?

6.38 ¿Cuáles son los primeros planos y direcciones de deslizamiento en metales FCC?

***6.39** En la red cristalina FCC, ¿cuáles son los cuatro planos de deslizamiento y las tres direcciones de deslizamiento principales?

6.40 ¿Cuáles son los planos y direcciones de deslizamiento principales en los metales BCC?

6.41 ¿Cuáles son los planos y direcciones de deslizamiento principales en los metales HCP?

6.42 Además de los planos basales, ¿qué otros planos de deslizamiento son importantes para metales HCP con una relación *c/a* baja?

6.43 ¿Qué es la tensión de cizalladura crítica de un monocristal de metal puro?

6.44 ¿Por qué metales FCC puros como Ag y Cu tienen un bajo valor de τ_c?

6.45 ¿Cuál es la causa de los altos valores de τ_c del titanio HCP?

***6.46** Se aplica una tensión de 75 MPa en la dirección [001] de un monocristal FCC. Calcule *a*) la tensión de cizalladura que actúa en el sistema de deslizamiento (111) $[\bar{1}01]$, *b*) la tensión de cizalladura que actúa en el sistema de deslizamiento (111) $[\bar{1}10]$.

6.47 Se aplica una tensión de 55 MPa en la dirección [001] de un monocristal BCC. Calcule *a*) la tensión de cizalladura que actúa en el sistema de deslizamiento (101) $[\bar{1}11]$ y *b*) la tensión de cizalladura que actúa en el sistema de deslizamiento (110) $[\bar{1}11]$.

***6.48** Determine la tensión que debe aplicarse al eje $[1\bar{1}0]$ de un monocristal de cobre de alta pureza para producir el deslizamiento en el sistema $(1\bar{1}\bar{1})$ $[0\bar{1}1]$. La tensión de cizalladura crítica para el monocristal es de 0.85 MPa.

***6.49** Se aplica una tensión de 4.75 MPa en la dirección $[00\bar{1}]$ de una celda elemental de un monocristal de cobre FCC. Calcule la tensión de cizalladura que actúa en las siguientes direcciones del plano de deslizamiento: *a*) $[\bar{1}0\bar{1}]$, *b*) $[0\bar{1}\ \bar{1}]$ y *c*) $[\bar{1}10]$.

6.50 Se aplica una tensión de 2.78 MPa en la dirección $[1\bar{1}1]$ de una celda elemental de un monocristal de plata FCC. Calcule la tensión de cizalladura que actúa en las siguientes direcciones del plano de deslizamiento (111): *a*) $[\bar{1}01]$, *b*) [011] y *c*) [110].

6.51 Se aplica una tensión de 2.34 MPa en la dirección [001] de una celda elemental de un monocristal de cobre FCC. Calcule la tensión de cizalladura que actúa en las siguientes direcciones del plano de deslizamiento $(\bar{1}11)$: *a*) [101], *b*) [110] y *c*) $[0\bar{1}1]$.

***6.52** Se aplica una tensión de 85 MPa en la dirección [001] de una celda elemental de un monocristal de hierro BCC. Calcule la tensión de cizalladura que actúa en sistemas de deslizamiento siguientes: *a*) (011) $[1\bar{1}1]$, *b*) (110) $[\bar{1}11]$ y (*c*) $(0\bar{1}1)$ [111].

6.53 Se aplica una tensión de 92 MPa en la dirección [001] de una celda elemental de un monocristal de hierro BCC. Calcule la tensión de cizalladura que actúa en los sistemas de deslizamiento siguientes: *a*) (011) $[\bar{1}\ \bar{1}1]$, *b*) $(1\bar{1}0)$ [111] y *c*) $(\bar{1}01)$ [111].

6.54 Describa el proceso de deformación por maclado que ocurre en algunos metales cuando se deforman plásticamente.

6.55 ¿Cuál es la diferencia entre el maclado y el mecanismo por deslizamiento en la deformación plástica de metales?

6.56 ¿Qué función desempeña el maclado en la deformación plástica de metales con respecto a la deformación por deslizamiento?

6.57 ¿Por qué la deformación por maclado es tan importante en los metales HCP?

6.58 ¿Mediante qué mecanismo los límites de grano endurecen los metales?

6.59 ¿Qué evidencia experimental demuestra que los límites de grano detienen el deslizamiento de los metales policristalinos?

6.60 Describa los cambios de forma que tienen lugar cuando una chapa de aleación de cobre originalmente con grano equiaxial se lamina en frío hasta reducciones de 30 y de 50 por ciento.

6.61 ¿Qué ocurre a la subestructura de dislocaciones del problema 6.60?

6.62 ¿Cómo es afectada la ductilidad de un metal por el trabajo en frío? ¿Por qué?

6.63 Una barra de cobre libre de oxígeno debe tener una resistencia a la tracción de 50.0 ksi y un diámetro final de 0.250 pulgadas. *a*) ¿A qué cantidad de trabajo en frío debe ser sometida (véase la figura 6.45)? *b*) ¿Qué diámetro inicial deberá tener la barra?

***6.64** Una chapa de latón con 70% Cu-30% Zn se le lamina en frío desde 0.070 hasta 0.040 pulgadas. *a*) Calcule el porcentaje de trabajo en frío y *b*) a partir de la figura 6.46, estime la resistencia a la tracción, el límite elástico y el alargamiento.

6.65 Un alambre de latón con 70% Cu-30% Zn se trefila 20% hasta 2.80 mm de diámetro y se trefila de nuevo hasta 2.45 mm de diámetro. *a*) Calcule el porcentaje total de trabajo en frío aplicado al alambre. *b*) A partir de la figura 6.46, estime la resistencia a la tracción, límite elástico y alargamiento.

6.66 ¿En qué consiste el endurecimiento por disolución sólida? Describa los dos tipos principales.

6.67 ¿Cuáles son los dos factores más importantes que afectan al endurecimiento por disolución sólida?

6.68 ¿Cuáles son las tres principales etapas metalúrgicas por las que atraviesa una placa de metal trabajada en frío, por ejemplo, de aluminio o cobre, a medida que se calienta y pasa de la temperatura ambiente a una temperatura elevada justo por debajo de su punto de fusión?

6.69 Describa la microestructura de un metal fuertemente trabajado en frío de una aleación de Al-0.8% Mg, como se observa con un microscopio óptico a 100× (véase la figura 6.48*a*). Describa la microestructura del mismo material a 20 000× (véase la figura 6.49*a*).

6.70 Describa lo que ocurre microscópicamente cuando una plancha de metal trabajada en frío, por ejemplo, de aluminio, es sometida a un tratamiento de recuperación térmico.

6.71 Cuando un metal trabajado en frío se calienta a un intervalo de temperatura en el que ocurre la recuperación, ¿cómo se verán afectados los siguientes elementos: *a*) tensiones residuales internas, *b*) resistencia, *c*) ductilidad, *d*) dureza?

6.72 Describa lo que ocurre a escala microscópica cuando una placa de metal trabajada en frío, por ejemplo, de aluminio, se somete a un tratamiento de recristalización por calor.

6.73 Cuando un metal trabajado en frío se calienta a un intervalo de temperatura en el que ocurre la recristalización, ¿cómo son afectados los siguientes elementos: *a*) tensiones residuales internas, *b*) resistencia, *c*) ductilidad, *d*) dureza?

6.74 Describa los dos principales mecanismos mediante los cuales puede ocurrir la recristalización primaria.

6.75 Menciónense cinco factores importantes que afectan el proceso de recristalización en metales.

6.76 ¿Qué generalizaciones pueden hacerse acerca de la temperatura de recristalización con respecto: *a*) el grado de deformación, *b*) la temperatura, *c*) el tiempo de calentamiento a temperatura, *d*) el tamaño de grano final y *e*) la pureza del metal?

6.77 Si la recristalización a 50 por ciento de una placa de aleación de aluminio 1100-H18 demora 115 h a 250°C y 10 h a 285°, calcule la energía de activación en kilojoules por mol para este proceso. Suponga una conducta de velocidad de tipo Arrhenius.

6.78 Si la recristalización a 50 por ciento de una placa de cobre de gran pureza demora 12 minutos a 140°C y 200 minutos a 88°, ¿cuántos minutos hacen falta para recristalizar 50 por ciento de la placa a 100°C? Suponga una conducta de velocidad de tipo Arrhenius.

6.79 Si la recristalización completa de una placa de aluminio demora 80 h a 250°C y 6 h a 300°C, calcule la energía de activación en kilojoules por mol para este proceso. Suponga una conducta de velocidad de tipo Arrhenius.

6.14 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. *a*) ¿Cómo podría fabricar grandes hélices para buques? *b*) Seleccione un material adecuado para esta aplicación. Razone su elección.

2. *a*) Nombre cinco componentes que estén fabricados por fundición. *b*) ¿Por qué la fundición es tan popular?

3. Si tuviera que hacer un componente de plata, oro u otro metal precioso ¿qué proceso utilizaría? ¿Por qué?

4. Si tuviera que fabricar sólo dos unidades de un componente metálico particular, ¿qué proceso seleccionaría?

5. Considere la fundición de un tubo de paredes finas fabricado con fundición férrica. Si el proceso de fundición se controla de tal modo que la solidificación tenga lugar desde la pared interior del tubo hacia afuera, las capas exteriores se contraerían durante la solidificación y ejercerían una tensión residual compresiva sobre las paredes interiores. *a*) ¿Cuál es la ventaja de desarrollar tensiones residuales compresivas? *b*) Proponga un proceso que permita las condiciones de solidificación deseadas.

6. Considere la colada de un cubo y de una esfera del mismo volumen y del mismo metal. ¿Cuál solidificaría más rápido? ¿Por qué?

7. En el proceso de laminación, la selección del material del rodillo de laminación es crítico. *a*) A partir de su conocimiento del proceso de laminación en frío y en caliente, responda: ¿qué propiedades debe tener el material del rodillo? *b*) Seleccione un material apropiado para esta aplicación.

8. Diseñe un proceso para producir barras de gran longitud y sección en H de acero (indique frío o caliente si es el caso). Dibuje un esquema que muestre ese proceso.

9. ¿Qué proceso elegiría para fabricar una rueda de ferrocarril (indique frío o caliente, si es el caso)? Justifique su elección.

10. Cuando se fabrican formas complejas utilizando forja en frío y operaciones de laminación, las propiedades mecánicas del material tales como el límite elástico y la resistencia a la tracción varían según sea la zona y dirección del componente donde se miden. *a*) ¿Cómo explicaría esto desde un punto de vista microscópico?, *b*) ¿Ocurrirá durante la forja o laminación en caliente? Razone su respuesta.

11. ¿Qué proceso elegiría para producir barra corrugada como la que se utiliza en el hormigón armado (indique frío o caliente, si es el caso)?

12. Si tuviera que elegir un material con la menor deformación elástica posible para la construcción de un brazo de robot (importante para el correcto posicionamiento del brazo) y el peso no fuera un criterio crítico, ¿qué material de entre los que se muestran en la figura 6.25 elegiría? ¿Por qué?

13. Debe seleccionar un material para la construcción de un engranaje industrial de entre los de la figura 6.25. La tenacidad es el criterio principal. ¿Qué material escogería?

14. Para una determinada aplicación debe utilizarse una barra de cobre de una pulgada de diámetro. Usted tiene barras de cobre de distintas secciones transversales, todas ellas totalmente recocidas y con un límite elástico de 10 ksi. El material final debe tener un límite elástico de al menos 30 ksi y un alargamiento de al menos 20 por ciento. Diseñe un proceso que permita obtener estos requerimientos. Utilice la figura 6.45 para la solución.

15. Es necesario seleccionar el material adecuado para que una barra de sección de 2.7 pulgadas^2 y longitud 75 pulgadas no se deforme plásticamente y el alargamiento no

supere 0.1 pulgadas cuando sea sometida a una fuerza axial de 45 000 lb_f. Utilice la tabla 6.1 y la figura 6.25 para seleccionar el material adecuado.

16. En un monocristal sometido a carga, determine los ángulos ϕ y λ para que se produzca la tensión de cizalladura máxima.

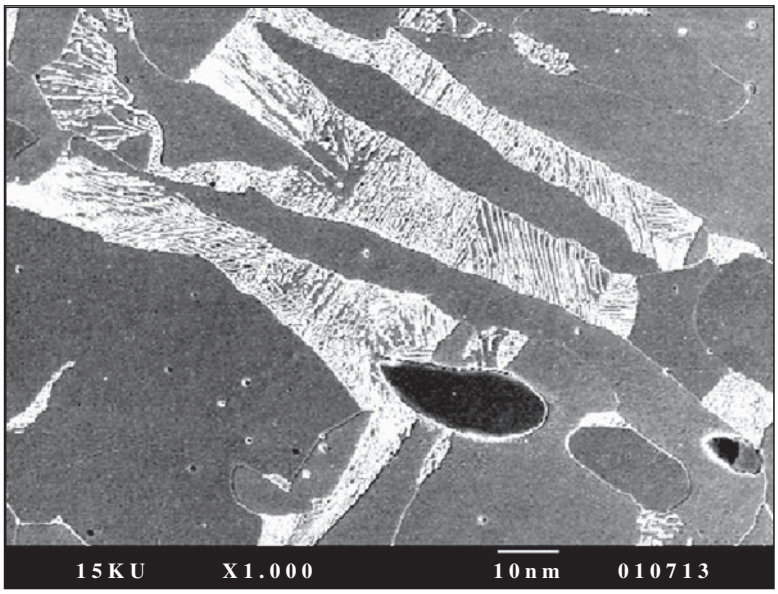
17. *a*) En un monocristal sometido a carga, ¿cómo orientaría el cristal con respecto a la fuerza axial para que la tensión de cizalladura fuera cero? *b*) ¿Cuál es su significado físico, es decir, qué ocurre en el cristal cuando σ aumenta?

18. ¿Cuál de las siguientes disoluciones sólidas sustitucionales seleccionaría si el criterio de selección fuera la máxima resistencia a la tracción: Cu-30% en un peso de zinc o Cu-30% en peso de níquel?

19. Las disoluciones sólidas sustitucionales de cupro-níquel Cu-40% en peso de níquel y Ni-10% en peso de cobre tienen similar resistencia a la tracción. Para una determinada aplicación en que sólo fuera importante la resistencia a la tracción, ¿cuál seleccionaría?

CAPÍTULO 7

Propiedades mecánicas de metales II



(© The Minerals, Metals & Materials Society, 1968)

El 12 de abril de 1912, a las 11:40 p.m., el *Titanic* en su viaje inaugural se impactó contra un gran iceberg, dañando su casco y causando que seis de los compartimientos de proa se rompieran. La temperatura del agua del mar a la hora del accidente era de –2°C. La posterior inundación de los compartimientos tuvo por resultado la fractura completa del casco y la trágica pérdida de más de 1 500 vidas.

El *Titanic* fue hallado en el lecho marino por Robert Ballard el 1o. de septiembre de 1985 a 3.7 km de profundidad. Con base en las pruebas metalúrgicas y mecánicas realizadas al acero del *Titanic*, se determinó que la temperatura de transición dúctil-frágil del acero empleado en el *Titanic* era de 32°C para los especímenes longitudinales del casco y de 56°C para los especímenes transversales. Ello indica que el acero empleado en la construcción se comportó de manera altamente frágil cuando el buque chocó contra el iceberg. La microestructura del acero del *Titanic* que aparece en la imagen muestra los granos de ferrita (gris), colonias de perlita (de estructura laminar) y partículas de MnS (oscuras). ■

[1]http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9801/Felkins-9801.html#ToC6

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Describir el proceso de fractura de los metales y diferenciar entre fractura dúctil y fractura frágil.
2. Describir la transición de los metales de dúctiles a frágiles. ¿Qué tipo de metales son más susceptibles a esta transición TDF?
3. Definir la resistencia a la fractura de un material y explicar por qué se aplica esta propiedad en el diseño de ingeniería en lugar de la tenacidad.
4. Definir la carga de fatiga y la falla por fatiga en los materiales. Describir los parámetros empleados para caracterizar esfuerzos fluctuantes. Enumerar los factores que afectan la resistencia a la fatiga de los materiales.
5. Describir la fluencia, la prueba de fluencia y la aplicación del parámetro de Larsen-Miller en el diseño para la determinación del esfuerzo de ruptura.
6. Describir por qué es importante el análisis de un componente que falló y qué medidas se toman en el análisis de las fallas.
7. Describir el efecto del tamaño de grano a escala nano en la resistencia y la ductilidad de un metal.

Este capítulo es la continuación del estudio de las propiedades mecánicas de los metales. Primeramente se estudiarán algunos aspectos de la fractura de los metales. A continuación se examinarán la fatiga y la velocidad de propagación de las fisuras en los metales, y finalmente, la fluencia o la cedencia (deformación del material en función del tiempo), así como el esfuerzo de ruptura.

7.1 FRACTURA DE LOS METALES

Uno de los aspectos más importantes y prácticos de la selección de metales en el diseño, desarrollo y producción de nuevos componentes es la posibilidad de que el componente falle durante su funcionamiento habitual. La falla se puede definir como la *incapacidad* de un material o componente de 1) realizar la función prevista, 2) cumplir los criterios de desempeño aunque pueda seguir funcionando, o 3) tener un desempeño seguro y confiable incluso después de deteriorarse. El rendimiento, desgaste, la torcedura (inestabilidad elástica), la corrosión y la fractura son ejemplos de situaciones en las que ha fallado un componente.

Los ingenieros están profundamente conscientes de la posibilidad de fractura en los componentes que soportan cargas y sus posibles efectos dañinos en la productividad, seguridad y otras cuestiones económicas. Como resultado, todos los ingenieros de diseño, de manufacturas y de materiales aplican factores de seguridad en su análisis inicial para reducir la posibilidad de fractura o, esencialmente mediante el sobrediseño del componente o de la máquina. En muchos campos, como el del diseño y fa-

bricación de recipientes a presión, distintas dependencias han puesto en vigor códigos y normas que deben seguir todos los diseñadores y fabricantes. Sin importar el cuidado extremo que se tenga en el diseño, la fabricación y la selección de materiales para máquinas y componentes, las fallas son inevitables, y causan pérdidas de bienes y, por desgracia, a veces de vidas. Todo ingeniero 1) debe estar completamente familiarizado con el concepto de fractura o falla de los materiales y 2) ser capaz de obtener información de un componente que falló para poder determinar las causas de la falla. En la mayoría de los casos, los científicos e ingenieros analizan minuciosamente los componentes que han fallado para determinar la causa de la falla. La información obtenida se emplea para fomentar el desempeño seguro y minimizar la posibilidad de fallas mediante mejoras en los procesos de diseño y fabricación, y en la síntesis y selección de los materiales. Desde una perspectiva puramente mecánica, a los ingenieros les interesa la falla por fractura de los componentes diseñados fabricados con metales, materiales cerámicos, materiales compuestos, polímeros e incluso materiales electrónicos. En las próximas secciones se presentarán y expondrán distintas modalidades de la fractura y falla de los metales que están en uso. En los siguientes capítulos también se expondrán la fractura y falla de otras clases de materiales.

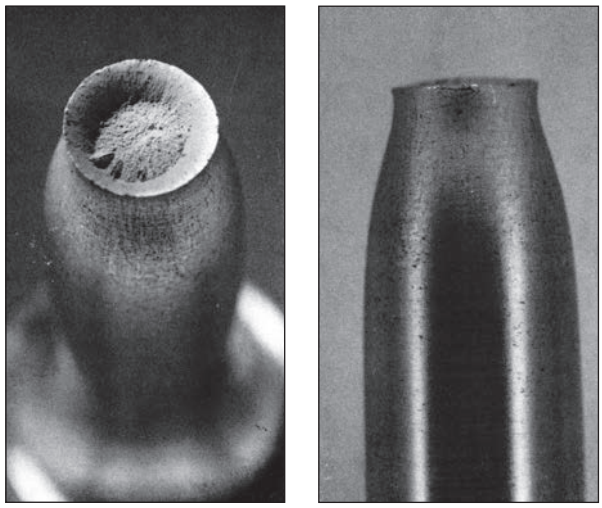
La *fractura* es la separación de un sólido en dos o más piezas bajo la acción de una fuerza. En general, la fractura de los metales puede clasificarse en dúctil y frágil, pero puede ser una mezcla de ambas. La **fractura dúctil** de un metal tiene lugar después de una deformación plástica intensa y se caracteriza por la lenta propagación de la fisura. La **fractura frágil**, en contraste, se produce usualmente a lo largo de planos cristalográficos característicos, denominados *planos de exfoliación* y presenta una rápida propagación de la fisura. En la figura 7.1 se muestra un ejemplo de fractura dúctil en una probeta de aleación de aluminio. Debido a su rapidez, las fracturas frágiles generalmente conducen a súbitas e inesperadas fallas catastróficas, mientras que la deformación plástica acompañada de fractura dúctil puede detectarse antes de que ocurra la fractura.

7.1.1 Fractura dúctil

Laboratorio virtual

La fractura dúctil de un metal tiene lugar después de una intensa deformación plástica. Por simplicidad, considérese la fractura dúctil de una probeta redonda (0.50 pulg de diámetro). Si se aplica un esfuerzo a la probeta tal que exceda su resistencia máxima a la tensión, y se mantiene suficiente tiempo, la probeta se fracturará. Pueden reconocerse tres etapas distintas en la fractura dúctil: 1) la muestra presenta una estricción y se forman cavidades en la zona de estricción (figuras 7.2*a* y *b*), 2) las cavidades formadas se juntan generando una fisura en el centro de la probeta que se propaga hacia la superficie de la misma y en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado (figura 7.2*c*) y 3) cuando la fisura se aproxima a la superficie, la dirección de la misma cambia a 45° respecto al eje de la tensión y se genera una fractura del tipo cono y copa (figura 7.2*d* y *e*). En la figura 7.3 se muestra una micrografía obtenida en el microscopio electrónico de barrido de una fractura dúctil correspondiente a una muestra de acero para muelles, y en la figura 7.4 se muestran las fisuras internas en la región de la estricción de una muestra deformada de cobre de alta pureza.

En la práctica, las fracturas dúctiles son menos frecuentes que las frágiles, y su principal causa es el exceso de carga aplicado al componente. La sobrecarga podría ocurrir como resultado de 1) un diseño inadecuado, lo que incluye a la selección de



Animación

Figura 7.1
Fractura dúctil (copa y cono) de una aleación de aluminio.
(Según ASM Handbook of Failure Analysis and Prevention, vol. 11. 1992. ASM International.)

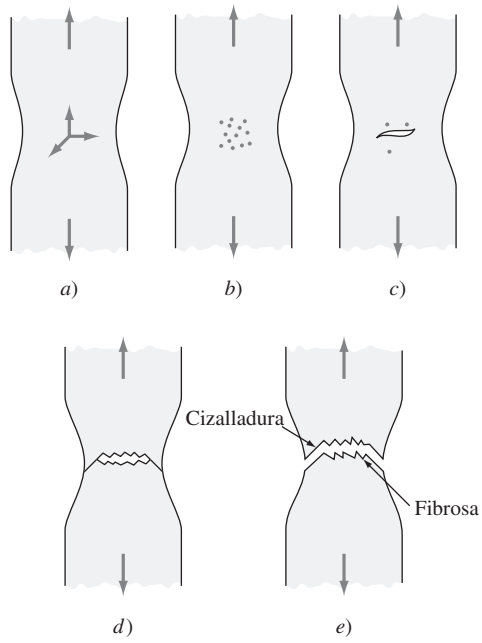


Figura 7.2
Etapas en la formación de una fractura dúctil de copa y cono.
(Según G. Dieter, "Mechanical Metallurgy", 2a. ed., McGraw-Hill, 1976, p. 278.)

materiales (componente subdiseñado), 2) fabricación inadecuada o 3) abuso (el componente se emplea a niveles de carga por encima del permitido por el diseñador). En la figura 7.5 se da un ejemplo de una fractura dúctil. En esta figura se muestra la flecha del eje trasero de un vehículo que ha sufrido torsión plástica (obsérvense las marcas de torsión sobre la flecha) debido a la torsión aplicada. Con base en el análisis de ingeniería, la causa de esta falla se ha atribuido a la mala elección del material. Para este componente se empleó acero para herramientas AISI tipo S7 con un nivel de dureza inadecuadamente bajo de 22-27 HRC. El requisito de dureza del metal era de más de 50 HRC, que suele alcanzarse mediante un proceso de tratamiento térmico (véase el capítulo 9).

7.1.2 Fractura frágil

Muchos metales y aleaciones se fracturan de forma frágil con muy poca deformación plástica. En la figura 7.6 se muestra un espécimen sometido a la tensión que falló en forma frágil. La comparación de esta figura con la 7.1 revela diferencias drásticas en el nivel de deformación previa a la fractura entre las fracturas dúctil y frágil. La fractura frágil suele avanzar a lo largo de los planos cristalográficos determinados lla-

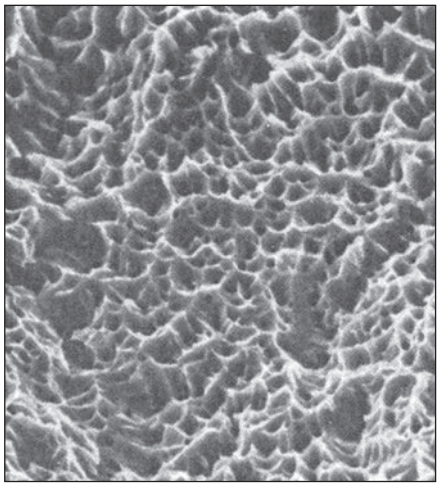


Figura 7.3
Micrografía obtenida por microscopia electrónica de barrido mostrando cavidades cónicas equiaxiales producidas durante la fractura de una probeta de resorte de acero para muelles. Estas cavidades, formadas por coalescencia de microhuecos de la fractura, son indicativas de una fractura dúctil.
(Según ASM Handbook, vol. 12—Fractography, p. 14, figura 2a, 1987. ASM International.)

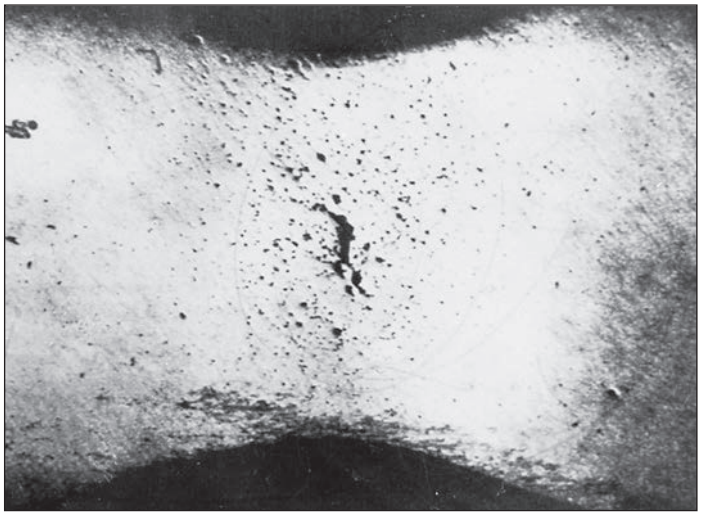


Figura 7.4
Agrietamiento interno de la región de estricción de una probeta de cobre policristalino de alta pureza (Ampliación de 9×).
[Según K. E. Puttick, Philas, Mag. **4:***964(1959).]*

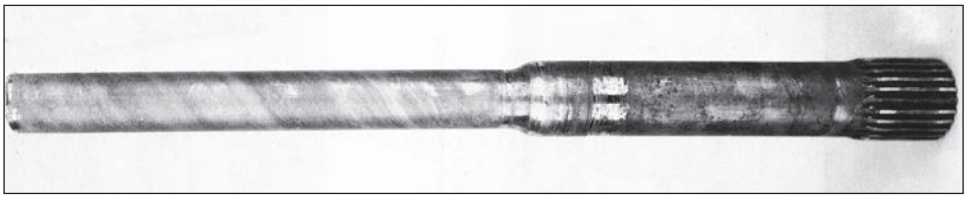
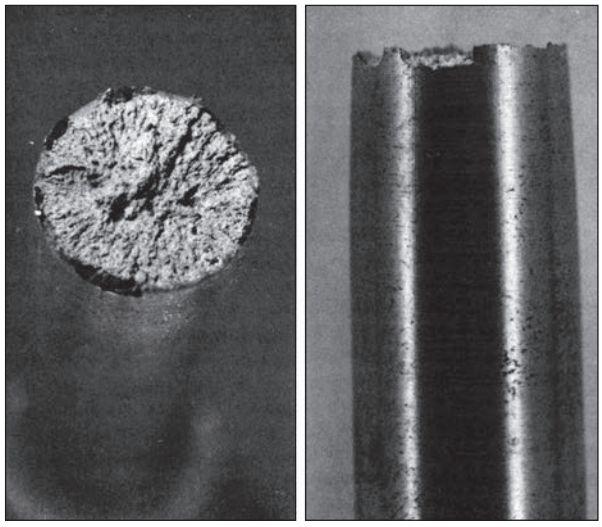


Figura 7.5
Falla en flecha de eje.
(ASM Handbook of Failure Analysis and Prevention, vol. 11. 1992. ASM International.)

mados *planos de exfoliación* bajo un esfuerzo normal al plano de exfoliación (véase la figura 7.7). Muchos metales con estructura cristalina HCP muestran habitualmente fractura frágil debido al número limitado de planos de deslizamiento. Un monocristal de zinc, por ejemplo, bajo un elevado esfuerzo normal a los planos (0001), se fracturará de forma frágil. Muchos metales BCC como el hierro α, molibdeno y volframio también se fracturan de forma frágil a bajas temperaturas y a elevadas velocidades de deformación.



Laboratorio virtual

Figura 7.6
Fractura frágil de una aleación metálica que muestra surcos radiales que emanan del centro del espécimen.
(ASM Handbook of Failure Analysis and Prevention, vol. 11. 1992, ASM International.)

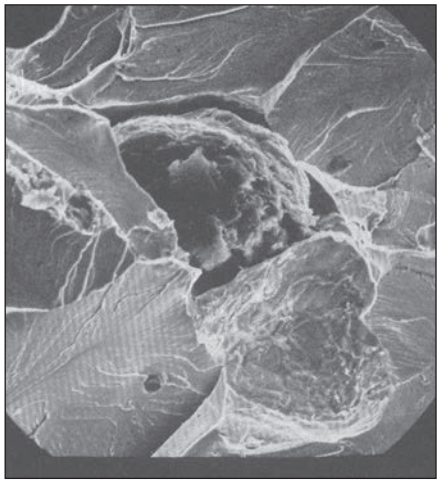


Figura 7.7
Fractura frágil por exfoliación en una fundición de hierro ferrítico dúctil. SEM, 1000×.
(Según W. L. Bradley, Texas A&M University, ASM Handbook, vol. 12, p. 237, figura 97, 1987. ASM International.)

Las fracturas frágiles en los metales policristalinos, en su mayoría, son transgranulares, es decir, la fisura se propaga a través del interior de los granos. Sin embargo, la fractura frágil puede ocurrir de manera intergranular si los límites de grano contienen una película frágil o si la relación del límite de grano se ha hecho frágil por la segregación de elementos perjudiciales.

Se cree que la fractura frágil tiene lugar en los metales en tres etapas:

1. La deformación plástica concentra las dislocaciones a lo largo de los planos de deslizamiento en los obstáculos.

2. El esfuerzo cortante se acumula en los lugares donde las dislocaciones están bloqueadas y como resultado se nuclean microfisuras.

3. Un esfuerzo posterior propaga las microfisuras y la energía de deformación elástica almacenada puede contribuir a la propagación de las mismas.

En muchos casos, las fracturas frágiles ocurren debido a la existencia de defectos en el metal. Estos defectos se forman durante la etapa de fabricación o aparecen durante el desempeño. Pueden formarse defectos indeseables como pliegues, grandes inclusiones, flujo de grano indeseable, microestructura defectuosa, porosidad, roturas y fisuras durante las operaciones de manufactura como el forjado, laminado, extrusión y colado. Con frecuencia las fisuras por fatiga, la fragilidad del material debido al hidrógeno atómico (véase la sección 13.5.11) y el daño causado por la corrosión dan por resultado una fractura frágil. Cuando la fractura frágil ocurre, se inicia sistemáticamente en el lugar del defecto (*muescas de tensión*) sin importar la causa de la formación del

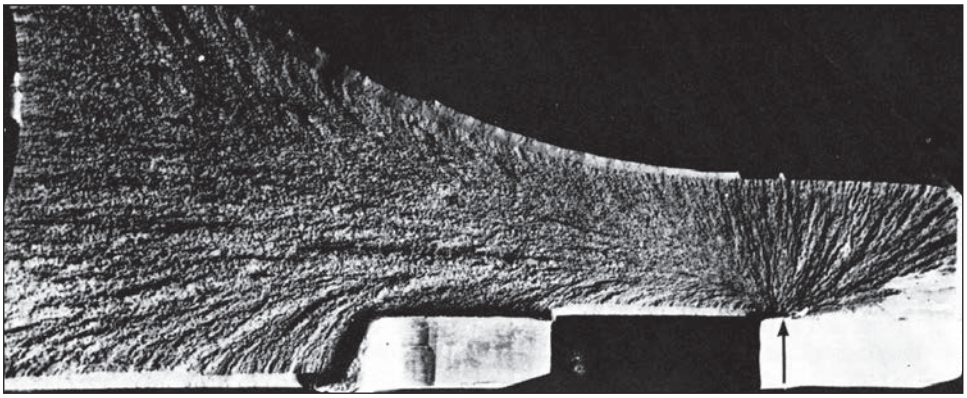


Figura 7.8
Una abrazadera fabricada con acero 4335 con falla frágil debido a la existencia de un borde filoso.
(ASM Handbook of Failure Analysis and Prevention, vol. 11. 1992, ASM International.)

defecto. Determinados defectos, bajas temperaturas de operación o velocidades altas de carga también pueden causar la fractura frágil de algunos materiales moderadamente dúctiles. La transición del comportamiento dúctil a frágil se denomina **transición de dúctil a frágil** (**TDF**). Así, materiales que son usualmente dúctiles pueden, en determinadas circunstancias, fracturarse de manera frágil. En la figura 7.8 se muestra la fractura frágil de una abrazadera debido a la existencia de una esquina filosa como defecto (véase la flecha en la figura); obsérvese el patrón de zig-zag que apunta hacia el origen de la fractura (suele hallarse en la superficie de una fractura frágil).

7.1.3 Tenacidad y prueba de impacto

La *tenacidad* es una medida de la cantidad de energía que un material puede absorber antes de fracturarse. Esta propiedad es de importancia en la ingeniería cuando se considera la capacidad que tiene un material para soportar un impacto sin que se produzca la fractura. Uno de los métodos más simples de medida de la tenacidad es la prueba de impacto. En la figura 7.9 se muestra el diagrama esquemático de una máquina sencilla para la prueba de impacto. Una de las formas de utilizar este aparato consiste en colocar una probeta Charpy con muesca en V a lo largo junto a los brazos paralelos de la máquina (tal como se muestra en la parte superior de la figura 7.9). A continuación, se suelta el péndulo pesado desde una altura determinada, el cual golpea a la probeta en su trayectoria descendente fracturándola. Conocida la masa del péndulo y la diferencia entre las alturas inicial y final se determina la energía presente en el proceso de fractura. En la figura 7.10 se muestra el efecto relativo de la temperatura en la energía de impacto de diversos tipos de materiales.

7.1.4 Temperatura de transición de dúctil a frágil

Como se mencionó anteriormente, en determinadas condiciones se observa un cambio marcado en la resistencia a la fractura de algunos metales que están en uso, esto es, la transición de dúctil a frágil. Las bajas temperaturas, la aplicación de un gran esfuerzo

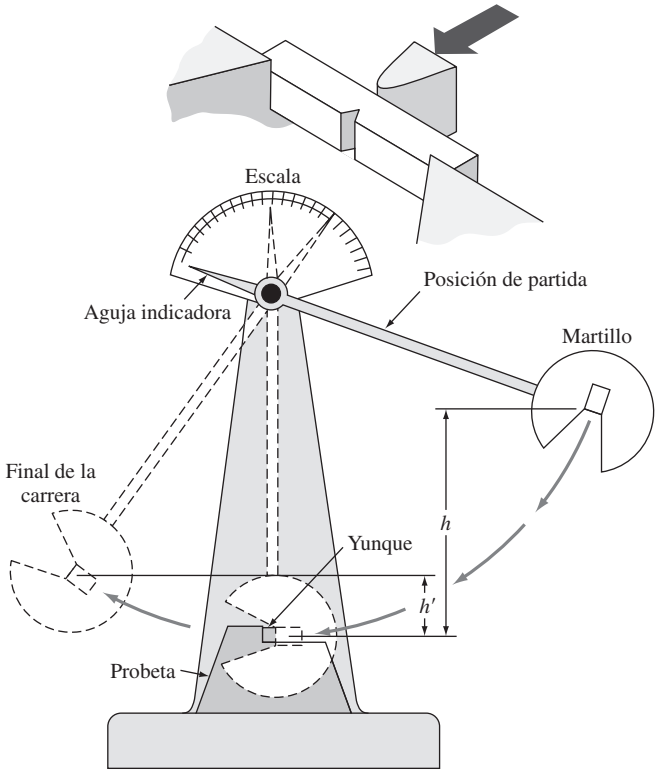


Figura 7.9
Esquema de un aparato estándar para la prueba de impacto.
(Según H. W. Hayden, W. G. Moffatt y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. III, Wiley, 1965, p. 13.)

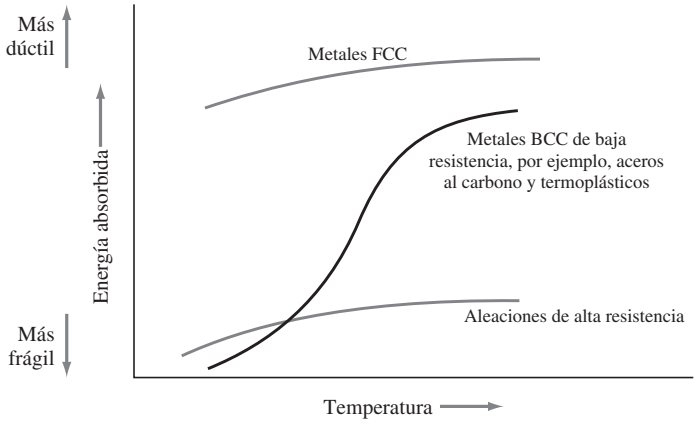


Figura 7.10
Efecto de la temperatura en la energía absorbida durante el impacto para diferentes tipos de materiales.

y velocidades de carga rápida pueden causar que un material dúctil se comporte de manera frágil; sin embargo, usualmente, la temperatura se selecciona como la variable que representa esta transición mientras que la velocidad de carga y la velocidad de aplicación del esfuerzo se mantienen constantes. El aparato de la prueba de impacto mencionado en la sección anterior puede emplearse para determinar el intervalo de temperatura para la transición en los materiales de su comportamiento dúctil a frágil. La temperatura de la probeta de Charpy puede fijarse empleando unidades para horno y para refrigeración. Aunque algunos metales muestran una temperatura TDF diferente, para muchos, esta transición ocurre a lo largo de un intervalo de temperaturas (véase la figura 7.10). Además, en la figura 7.10 se muestra que los metales FCC que no pasan por la TDF son adecuados para emplearse a baja temperatura. Los factores que influyen en la temperatura de TDF son la composición de la aleación, el tratamiento térmico y el procesado. Por ejemplo, el contenido de carbono de los aceros recocidos afecta este intervalo de temperatura de transición, como se muestra en la figura 7.11. Los aceros recocidos con bajo carbono tienen un intervalo de transición de menor temperatura, y más reducido que otros aceros con alto carbono. Asimismo, a medida que aumenta el contenido de carbono de los aceros recocidos, se vuelven más frágiles y se absorbe menos energía en el impacto durante la fractura.

La transición de dúctil a frágil es un importante elemento a tomar en cuenta en la selección de materiales para componentes que funcionan en ambientes fríos. Por ejemplo, los barcos que navegan en aguas frías (véase el capítulo de introducción) y las plataformas mar adentro que se localizan en los mares árticos, las cuales son en especial susceptibles a la TDF. Para tales aplicaciones, los materiales seleccionados deberían tener una temperatura de TDF que sea considerablemente menor que la temperatura de operación o de servicio.

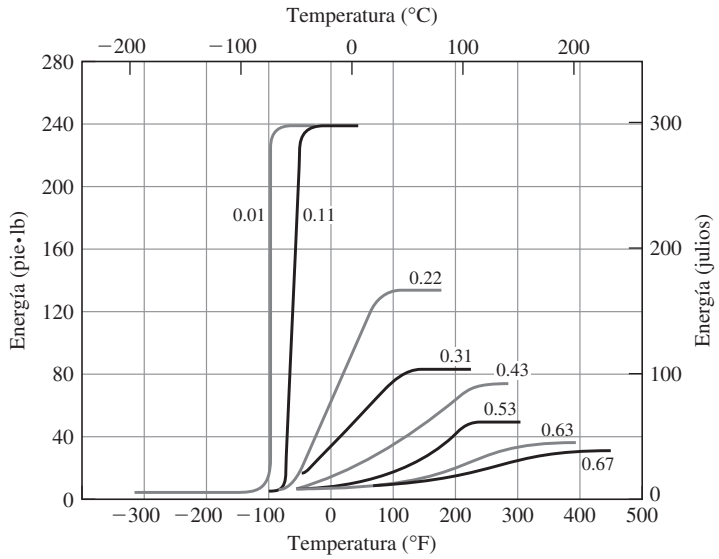


Figura 7.11
Efecto del contenido de carbono en las gráficas de energía de impacto-temperatura para varios aceros recocidos.
[Según J. A. Rinebolt y W. H. Harris, Texas, Trans. ASM, **43:***1175(1951).]*

7.1.5 Resistencia a la fractura

Las pruebas de impacto tal como se han descrito, facilitan datos cuantitativos comparativos mediante probetas y equipos relativamente simples. Sin embargo, estos ensayos no proporcionan los datos adecuados para el diseño de secciones de materiales que contienen fisuras o defectos. Este tipo de datos se obtienen a partir de la disciplina de la mecánica de la fractura, en la cual se realizan análisis teóricos y experimentales de la fractura de materiales estructurales que contienen fisuras o defectos preexistentes. En este libro se estudiará principalmente la propiedad de resistencia a la fractura y se mostrará su aplicación a algunos diseños de componentes simples.

La fractura de un metal (material) se inicia en el punto en que la concentración de esfuerzos es la más elevada, como puede ocurrir, por ejemplo, en el vértice de una fisura. Considérese una placa sometida a esfuerzo uniaxial que contiene una fisura en el borde (figura 7.12*a*) o en el interior (figura 7.12*b*). El esfuerzo es más elevado en el vértice de la fisura, como se muestra en la figura 7.12*c*.

Se ha encontrado que la intensidad del esfuerzo en el vértice de la fisura depende del esfuerzo aplicado y de la amplitud de la fisura. El factor intensidad-esfuerzo K_I se utiliza para expresar la combinación de los efectos del esfuerzo en el vértice de la fisura y la longitud de la misma. El subíndice I (mencionado "uno") indica el modo I de prueba, en el cual el esfuerzo de tensión conduce a la apertura de la fisura. Se ha encontrado experimentalmente para el caso de una tensión uniaxial en una placa que contiene una fisura en el borde o en su interior (prueba en modo I), que

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \tag{7.1}$$

donde K_I = factor intensidad-esfuerzos
σ = esfuerzo nominal aplicado
a = longitud de fisura en el borde o la mitad de la longitud de la fisura interna
Y = constante geométrica adimensional del orden de 1

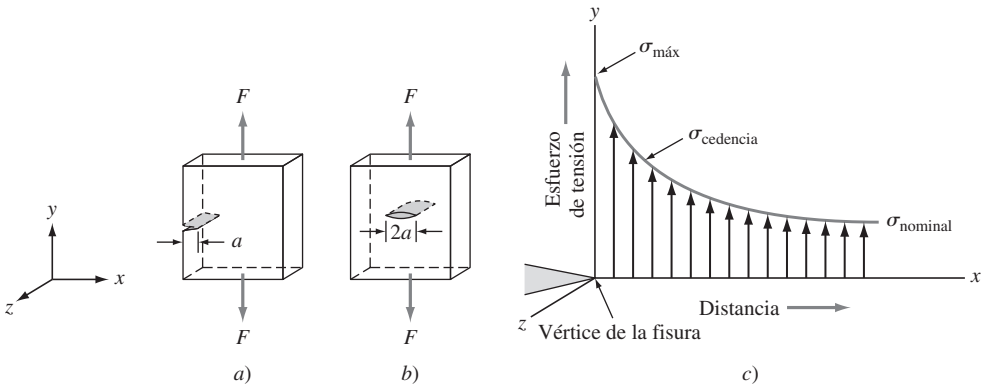


Figura 7.12
Placa de aleación metálica bajo tensión uniaxial *a*) con una fisura en el borde *a*, *b*) con una fisura en el centro 2*a*. *c*) Distribución de esfuerzos respecto a la distancia del vértice de la fisura. El esfuerzo es máximo en el vértice de la fisura.

El valor crítico del factor de intensidad-esfuerzos que causa la falla de la placa se denomina *resistencia a la fractura* K_{IC} (se pronuncia "ka-sub-uno-ce") del material. En el caso de un esfuerzo de fractura σ_f y un tamaño de fisura a para una fisura en el borde (o la mitad de la longitud para una fisura interna):

$$K_{IC} = Y\sigma_f \sqrt{\pi a} \tag{7.2}$$

Los valores de resistencia a la fractura (K_{IC}), tienen unidades de MPa$\sqrt{m}$ en el sistema internacional y ksi$\sqrt{in}$ en el sistema estadounidense. La figura 7.13*a* es un diagrama esquemático de una probeta de tipo compacto para determinar la resistencia a la fractura. Para obtener valores constantes de K_{IC}, la dimensión base B de la probeta, el espesor, debe ser comparativamente grande para garantizar que prevalezca durante la prueba la condición de deformación plana. Esta condición requiere que durante la prueba no exista deformación en la dirección de la muesca (o sea, en la dirección z de la figura 7.13*a*). En general, la condición de deformación plana se produce cuando B (espesor de la probeta) es igual a 2.5 (K_{IC}/esfuerzo de fluencia)^2. Obsérvese que la probeta tiene una muesca maquinada y una fisura generada por fatiga al final de la muesca de alrededor de 3 mm de profundidad en donde se inicia la fractura durante la prueba. En la figura 7.13*b* se muestra una prueba real de fractura al momento en que se produce la fractura rápida y rota para la determinación de la resistencia a la fractura.

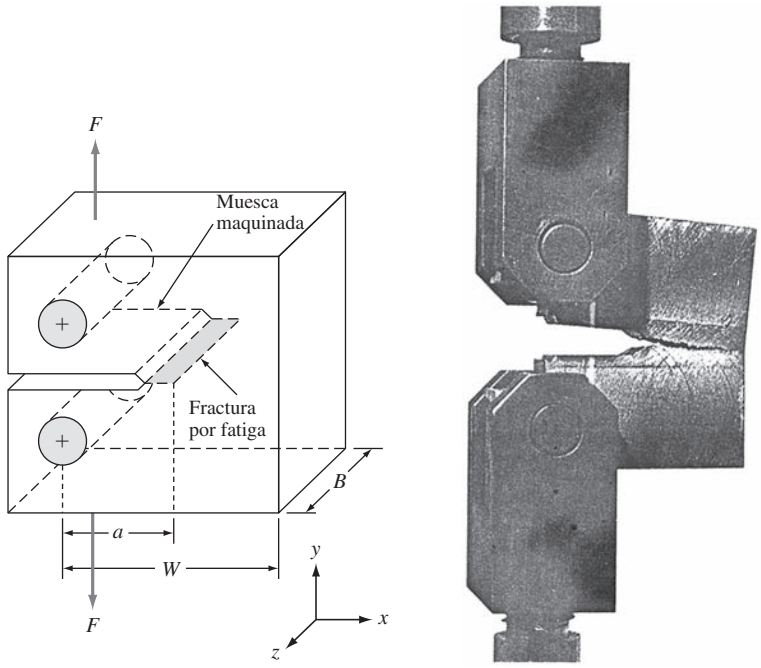


Figura 7.13
Prueba para determinar la resistencia a la fractura utilizando una probeta de tipo compacto y condiciones de deformación plana. *a*) Dimensiones de la probeta. *b*) Prueba real en el momento del esfuerzo crítico a la fractura, se utiliza un rayo láser para detectar este esfuerzo. *(Cortesía de White Shell Research.)*

Tabla 7.1 Valores típicos de tenacidad a la fractura para aleaciones metálicas

Material	K_{IC} MPa$\sqrt{m}$	K_{IC} ksi$\sqrt{in}$	σ esfuerzo de fluencia MPa	σ esfuerzo de fluencia ksi
Aleaciones de aluminio:				
2024-T851	26.4	24	455	66
7075-T651	24.2	22	495	72
7178-T651	23.1	21	570	83
Aleaciones de titanio:				
Ti-6A1-4V	55	50	1 035	150
Aceros aleados:				
4340 (acero de baja aleación)	60.4	55	1 515	220
17-7 pH (endurecimiento de precipitación)	76.9	70	1 435	208
350 acero recocido de martensita	55	50	1 550	225

Fuente: R. W. Herzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", 3a. ed., Wiley, 1989.

Los valores de resistencia a la fractura de los materiales son muy útiles en diseño mecánico, sobre todo cuando se trabaja con materiales de tenacidad o ductilidad limitada como son las aleaciones de aluminio de alta resistencia, el acero y las aleaciones de titanio. La tabla 7.1 contiene valores de K_{IC} para algunas de estas aleaciones. Los materiales que muestran una pequeña deformación plástica antes de fracturarse tienen relativamente bajos valores de K_{IC} y tienden a ser más frágiles, mientras que aquellos que presentan elevados valores de K_{IC} son más dúctiles. Los valores de resistencia a la fractura pueden utilizarse en el diseño mecánico para predecir el tamaño de fisura permitido en aleaciones con ductilidad limitada cuando actúan sobre ellas esfuerzos específicos también se aplica (un factor de seguridad para mayor confianza). El problema de ejemplo 7.1 ilustra un caso de este enfoque al diseño.

PROBLEMA DE EJEMPLO 7.1

El componente de una placa que forma parte de un diseño de ingeniería debe soportar un esfuerzo de tensión de 207 MPa (30 ksi). Si se utiliza la aleación del aluminio 2024-T851 para esta aplicación, ¿cuál es el máximo tamaño de la fisura interna que puede soportar este material? (Utilice $Y = 1$).

■ **Solución**

$$K_{IC} = Y\sigma_f \sqrt{\pi a} \tag{7.2}$$

Utilizando $Y = 1$ y $K_{IC} = 26.4$ MPa$\sqrt{m}$ de la tabla 7.1,

$$a = \frac{1}{\pi}\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_f}\right)^2 = \frac{1}{\pi}\left(\frac{26.4 \text{ MPa}\sqrt{m}}{207 \text{ MPa}}\right)^2 = 0.00518 \text{ m} = 5.18 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el mayor tamaño de fisura interna que puede soportar el componente es de $2a$, o (2)(5.18 mm) =10.36 mm.

7.2 FATIGA DE LOS METALES

En muchos tipos de aplicaciones las piezas metálicas sometidas a esfuerzos cíclicos o repetitivos se rompen por la **fatiga** que sufren debido a un esfuerzo mucho menor de lo que la pieza puede soportar durante la aplicación de un esfuerzo estático sencillo. Estas fallas se denominan **fallas por fatiga**. Las piezas móviles, como los ejes de

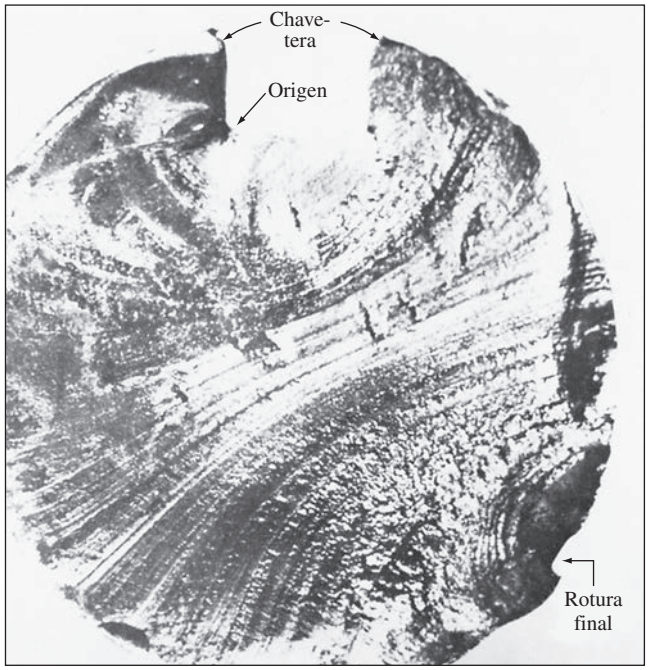


Figura 7.14
Fractografía de una superficie de fractura por fatiga de un eje fabricado con acero 1040 (dureza ~ Rockwell C 30). La fisura por fatiga se originó en la esquina inferior izquierda de la chavetera y se extendió casi completamente por toda la sección transversal antes de que ocurriera la fractura. (Ampliada $1\frac{7}{8}\times$.)
(Según "Metals Handbook", vol. 9, 8a. ed., American Society for Metals, 1974, p. 389. ASM International.)

transmisión de movimiento, bielas y engranajes, son ejemplos de piezas de las máquinas en las que es común la falla por fatiga. Algunas estimaciones de las fallas de las máquinas se atribuyen en un 80 por ciento de la acción directa a las fallas por fatiga.

En la figura 7.14 se muestra una falla por fatiga típica de un eje de transmisión hecho de acero. La falla por fatiga se origina en un punto de concentración de esfuerzos como lo es un extremo afilado o una muesca (figura 7.14), o en una inclusión metalúrgica o fisura. Una vez nucleada, la fisura se propaga a través de la pieza sometida a esfuerzos cíclicos o repetidos. En esta etapa del proceso de fatiga se forman las denominadas conchas de almeja o marcas de "playa", como se observa en la figura 7.14. Finalmente, la sección remanente se hace tan pequeña que no puede soportar la carga aplicada y tiene lugar la fractura del componente. Por ello, usualmente se pueden reconocer dos tipos distintos de superficie: 1) una región lisa debida a la fricción entre las superficies abiertas durante la propagación de la fisura a través de la sección, y 2) una superficie rugosa generada durante la fractura cuando la carga es demasiado elevada para la sección transversal remanente. En la figura 7.14, la fisura por fatiga se ha propagado a través de casi toda la sección transversal justo antes de que se produzca la rotura final.

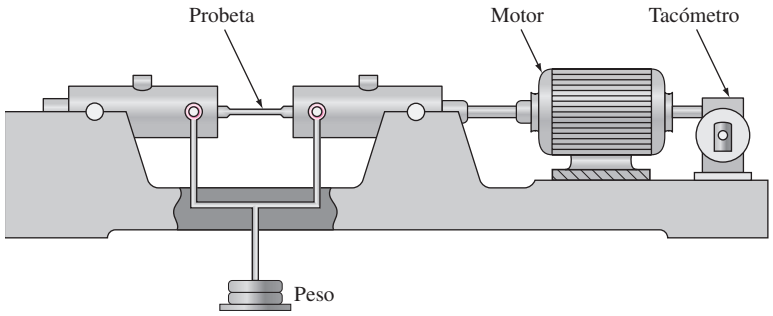
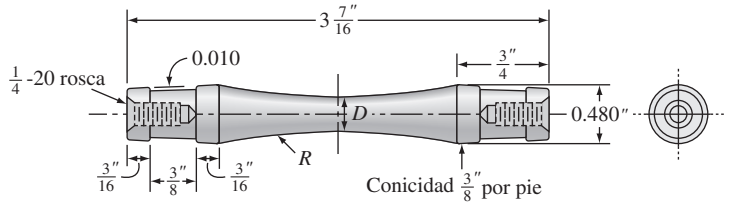


Figura 7.15
Diagrama esquemático de una máquina de fatiga por flexión rotativa de R. R. Moore.
(Según H. W. Hayden, W. G. Moffatt y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. III, Wiley, 1965, p. 15.)



D = 0.200 a 0.400 pulg seleccionada con base en la resistencia a la tensión
R = 3.5 a 10 pulg

Figura 7.16
Esquema que ilustra una probeta de fatiga para la prueba de flexión rotativa (tipo R. R. Moore).
(Según "Manual on Fatigue Testing", American Society for Testing and Materials, 1949.)

Se usan numerosos tipos de ensayo para determinar los **ciclos de resistencia** del material. La prueba de fatiga más comúnmente utilizada a menor escala es la prueba de fatiga por flexión alternante rotativa, en el cual la probeta se somete a esfuerzos alternos de tensión y compresión de la misma magnitud durante la rotación (figura 7.15). El esquema de una probeta para la prueba de fatiga por flexión alternante rotativa de R. R. Moore se muestra en la figura 7.16. La superficie de la probeta tiene que estar bien pulida y adelgazada en la parte central. Durante la prueba con este aparato, el centro de la probeta está sometido a tensión en su superficie inferior, mientras que en su superficie superior lo está a la compresión provocada por el peso aplicado en el centro del aparato (figura 7.15), exagerado en la figura 7.17. Los datos obtenidos se representan gráficamente en forma de curvas *SN*, en las cuales se representa al esfuerzo *S* que causa la falla en comparación con el número de ciclos *N* a los que se produce la falla. En la figura 7.18 se muestran curvas típicas *SN* para una aleación al alto carbono y una aleación de aluminio de alta resistencia. Para la aleación de aluminio, el esfuerzo que causa la fractura disminuye a medida que aumenta el número de ciclos. En el acero al carbono primeramente hay una disminución en la resistencia a la

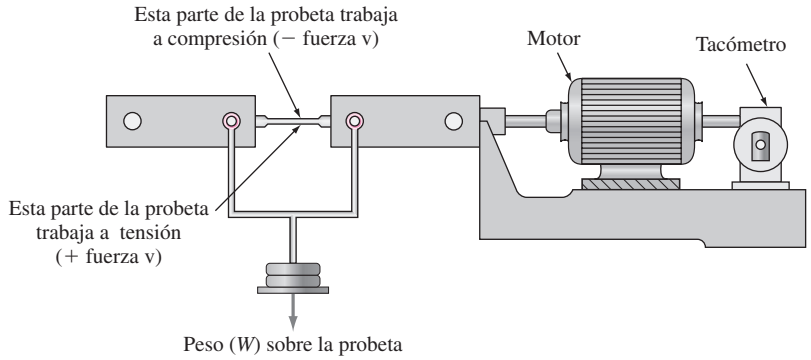


Figura 7.17
Flexión exagerada de una probeta para mostrar la acción que producen la fuerza de tensión positiva y la fuerza negativa de compresión sobre la misma.

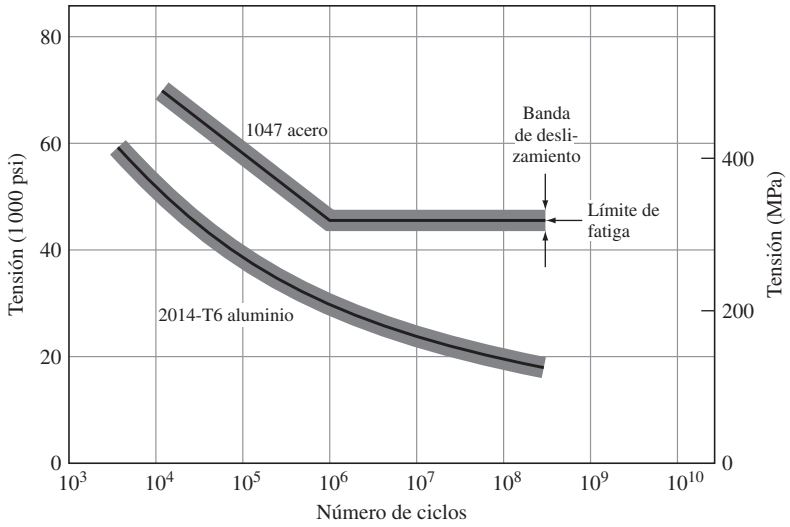


Figura 7.18
Curvas de esfuerzo en comparación con número de ciclos (*SN*) correspondientes a una falla por fatiga para una aleación de aluminio 2014-T6 y un acero de contenido medio de carbono 1047.
(Según H. W. Hayden, W. G. Moffatt y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. III, Wiley, 1965, p. 15.)

fatiga a medida que aumenta el número de ciclos y luego la curva *SN* se nivela, sin que disminuya la resistencia a la fatiga a medida que aumenta el número de ciclos. A esta parte horizontal del gráfico *SN* se denomina *límite de fatiga* o *resistencia a la fatiga* y se encuentra entre 10^6 y 10^{10} ciclos. Muchas aleaciones ferrosas presentan un límite de fatiga de aproximadamente la mitad de su resistencia a la tensión. Las aleaciones no ferrosas como las aleaciones de aluminio no presentan límite de fatiga y su resistencia es del orden de una tercera parte de su resistencia a la tensión.

7.2.1 Esfuerzos cíclicos

Los esfuerzos de fatiga aplicados en los casos reales y en las pruebas de fatiga pueden variar mucho. Los diferentes tipos de pruebas utilizadas en la industria y en la investigación suponen esfuerzos axiales, de flexión o de torsión. En la figura 7.19 se muestran las gráficas de fatiga en las que se representan el esfuerzo *versus* el número de ciclos de fatiga para tres pruebas de fatiga. En la figura 7.19*a* se muestra una gráfica en forma de una senoide representando al esfuerzo *versus* los ciclos de fatiga para un *ciclo de inverso de esfuerzos*. Esta gráfica es típica de las que se producen cuando una flecha gira a velocidad constante sin sobrecargas. La máquina de R. R. Moore para determinar la fatiga por pandeo alternado que se muestra en la figura 7.15 genera gráficas similares de esfuerzo *versus* número de ciclos de fatiga. En estos ciclos los esfuerzos máximos y mínimos son iguales. Por definición, los esfuerzos de tensión se consideran positivos y los de compresión, negativos y el esfuerzo máximo es el de mayor valor algebraico y el mínimo, el de menor valor.

La figura 7.19*b* muestra un *ciclo de esfuerzo repetido* en el cual el esfuerzo máximo $\sigma_{máx}$ y el mínimo $\sigma_{mín}$ son esfuerzos de tensión, sin embargo un ciclo de tensión repetido también puede tener esfuerzos máximos y mínimos de signo contrario, o ser ambos esfuerzos de compresión. Finalmente, un esfuerzo cíclico puede variar aleatoriamente en amplitud y frecuencia, como se muestra en la figura 7.19*c*. En este caso, puede haber un espectro de diferentes gráficas de fatiga de esfuerzo *versus* ciclo.

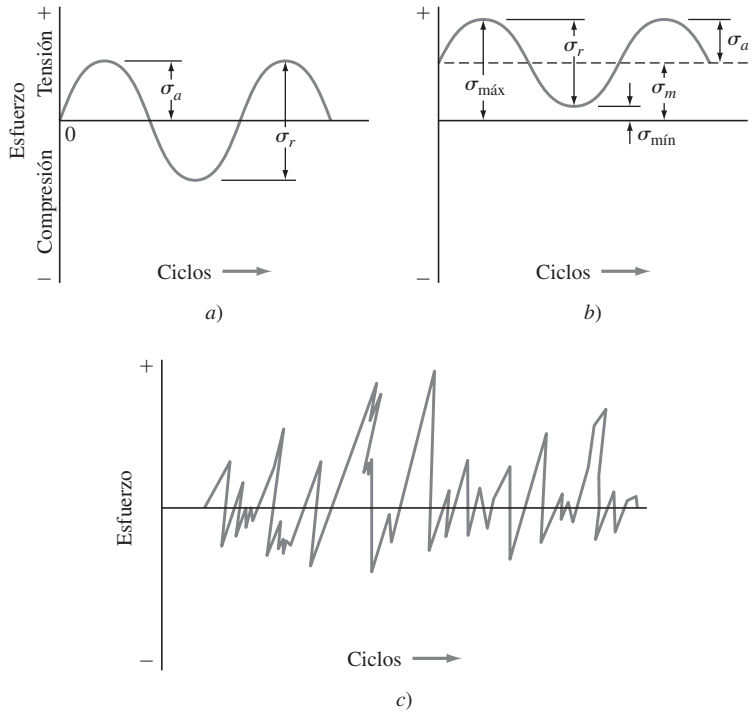


Figura 7.19
Gráficas de esfuerzos de fatiga *versus* número de ciclos. *a*) Ciclo de esfuerzos totalmente invertido. *b*) Ciclo de esfuerzos repetidos con $\sigma_{máx}$ y $\sigma_{mín}$ iguales. *c*) Ciclo de esfuerzos con valores al azar.

Los ciclos de esfuerzo variable se caracterizan por un cierto número de parámetros, siendo los más importantes los siguientes:

1. *Esfuerzo medio* σ_m es la media algebraica de los esfuerzos máximo y mínimo de un ciclo de fatiga.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} \tag{7.3}$$

2. *Rango del esfuerzo* σ_r es la diferencia entre la tensión máxima y la tensión mínima del ciclo $\sigma_{\text{máx}}$ y $\sigma_{\text{mín}}$

$$\sigma_r = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}} \tag{7.4}$$

3. *Amplitud del esfuerzo* σ_a es la mitad del ciclo del esfuerzo

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} \tag{7.5}$$

4. *Relación de esfuerzos R* es la relación entre los esfuerzos máximo y mínimo según:

$$R = \frac{\sigma_{\text{mín}}}{\sigma_{\text{máx}}} \tag{7.6}$$

7.2.2 Cambios estructurales básicos que tienen lugar en un metal dúctil durante el proceso de fatiga

Cuando una probeta de un metal homogéneo dúctil se somete a esfuerzos cíclicos durante el proceso de fatiga, tienen lugar los cambios estructurales básicos siguientes:

1. *Inicio de la fisura*. Se inicia el proceso de daño por fatiga.

2. *Crecimiento de fisuras en las bandas de deslizamiento*. El inicio de la fisura tiene lugar porque el proceso de la deformación plástica no es completamente reversible. La deformación plástica, primero en una dirección y después en dirección contraria, causa surcos y estriaduras en la superficie que se denominan *extrusiones en bandas* de deslizamiento e *intrusiones en banda* de deslizamiento en la superficie de la probeta metálica, así como daño en el interior del metal a lo largo de las bandas de *deslizamiento persistentes* (figuras 7.20 y 7.21). Las irregularidades en la superficie y el daño a lo largo de las bandas de deslizamiento persistentes, causan la formación de fisuras en o cerca de las superficies, las cuales se propagan dentro de la probeta a lo largo de los planos sujetos a esfuerzos cortantes considerables. Esta fase se denomina *etapa I del crecimiento de la fisura por fatiga*, y la velocidad de crecimiento es, en general, muy pequeña (por ejemplo, 10^{-10} m/ciclo).

3. *Crecimiento de fisura en planos sometidos a intenso esfuerzo cortante*. Durante la etapa I la fisura en un metal policristalino puede crecer sólo unos cuantos diámetros de grano antes de que cambie su dirección volviéndose perpendicular a la dirección del esfuerzo máximo de tensión sobre la probeta metálica. En la *etapa II del crecimiento de fisura*, una fisura bien definida se propaga a una velocidad relativamente elevada (por ejemplo, micrómetros por ciclo), y las estriaduras de fatiga se crean a medida que la fisura avanza a través de la sección transversal de la probeta (figura 7.14). Estas estriaduras son útiles en los análisis de falla por fatiga para determinar el origen y la dirección de propagación de las fisuras por fatiga.

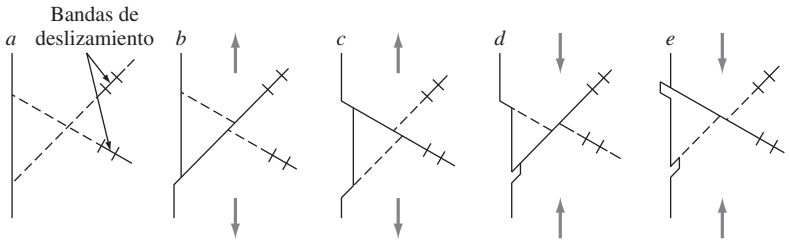


Figura 7.20
Mecanismo para la formación de extrusiones e intrusiones de bandas de deslizamiento.
[Según A. H. Cottrell y D. Hull, Proc. R. Soc. London, **242A:***211-213(1957).]*

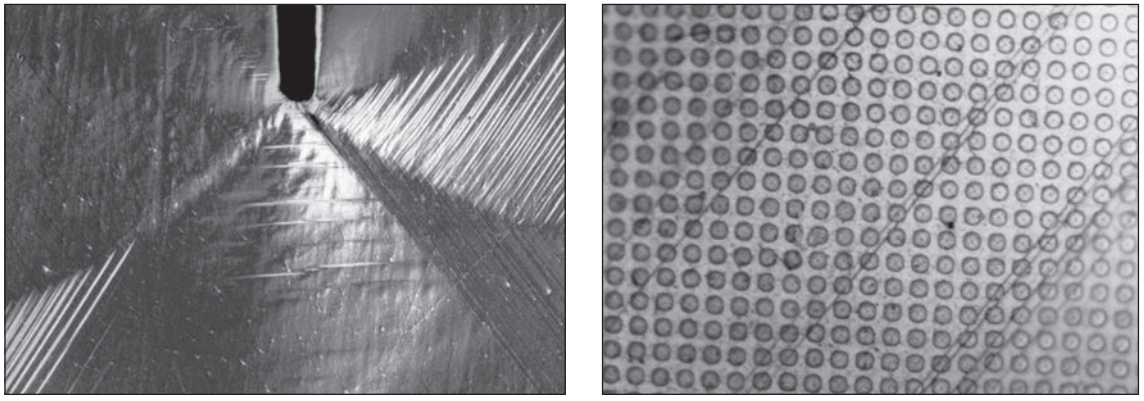


Figura 7.21
a) Bandas de deslizamiento persistentes en un monocristal de cobre. *b*) Los puntos de polímero depositados en la superficie son en muchos casos cortados por la mitad por las bandas de deslizamiento (líneas oscuras en la superficie) resultando un desplazamiento relativo en dos partes.
(Cortesía de Wendy C. Crone, University of Wisconsin.)

4. *Máxima deformación en el punto de fractura*. Finalmente, cuando la fisura cubre un área suficiente para que el resto de la sección no pueda soportar la carga aplicada, la probeta se rompe por fractura de tipo dúctil.

7.2.3 Factores de importancia que afectan la resistencia a la fatiga de los metales

La resistencia a la fatiga de un metal o aleación es afectada por otros factores además de la composición química del metal. Algunos de los factores más importantes son:

1. *Concentración de esfuerzos*. La resistencia a la fatiga queda reducida de forma muy importante por la presencia de puntos con concentración de esfuerzos tales como muescas, orificios, hendiduras o cambios bruscos en la sección transversal. Por ejemplo, la falla por fatiga que se muestra en la figura 7.14, se inició en la chavetera del eje de transmisión de acero. Las fallas por fatiga pueden minimizarse mediante un diseño cuidadoso que evite en lo posible los puntos de concentración de esfuerzos.

2. *Aspereza superficial*. En general, cuanto más liso sea el acabado superficial de la probeta metálica, mayor será su resistencia a la fatiga. Las superficies ásperas generan concentración de esfuerzos que facilitan la formación de fisuras por fatiga.

3. *Estado de la superficie*. Puesto que la mayoría de las fallas por fatiga se originan en la superficie del metal, cualquier cambio importante en las condiciones de la superficie afectará la resistencia a la fatiga del metal. Por ejemplo, los tratamientos para el endurecimiento de la superficie de los aceros, como carburización y la nitruración que endurecen la superficie, incrementan la vida a la fatiga. Por otra parte, la descarburización, que ablanda la superficie de un acero tratado térmicamente, disminuye la vida de la fatiga. La introducción de esfuerzos residuales de compresión también incrementan los ciclos de resistencia.

4. *Medio ambiente*. Si se encuentra presente un ambiente corrosivo durante la aplicación de ciclos de fatiga a un metal, el ataque químico acelera de manera muy importante la velocidad a la cual se propaga la fisura por fatiga. La combinación del ataque corrosivo y los esfuerzos cíclicos en un metal se conoce como *corrosión-fatiga*.

7.3 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS FISURAS POR FATIGA

Los datos de fatiga para metales y aleaciones relativos a fatiga de alto número de ciclos (por ejemplo, vidas a la fatiga superiores a 10^4 a 10^5 ciclos), en su mayoría, están relacionados con los esfuerzos nominales requeridos para causar la falla a un determinado número de ciclos, es decir, con las curvas *SN* como las que se muestran en la figura 7.18. Sin embargo, para estas pruebas se han utilizado probetas lisas o con muescas y, en consecuencia, es difícil distinguir entre el inicio de la fisura por fatiga y la duración de la propagación de la fisura por fatiga. De esta forma, se han desarrollado pruebas para medir los ciclos de resistencia asociados a las grietas preexistentes en el material.

Las grietas preexistentes o fisuras dentro de un material reducen o pueden eliminar la parte inicial de la fisura en la vida de la fatiga de un componente. En consecuencia, los ciclos de resistencia de un componente con defectos preexistentes puede ser considerablemente más pequeña que la vida útil de un componente sin defectos. En esta sección se utilizará la metodología de la mecánica de la fractura para obtener una relación que permita predecir los ciclos de resistencia de un material sometido a la acción de la fatiga cíclica, el cual se encuentra con defectos preexistentes y bajo condiciones de esfuerzo.

En la figura 7.22 se muestra la instrumentación experimental de fatiga de elevado número de ciclos para medir la velocidad de crecimiento de la fisura en una probeta de metal del tipo compacto, que contiene una fisura de longitud conocida. En este instrumento, la acción de la fatiga cíclica se genera en la dirección vertical superior e inferior y la longitud de la fisura se mide por el cambio en el potencial eléctrico producido por la fisura cuando se abre y se extiende por la acción de la fatiga.

7.3.1 Correlación entre la propagación de la fisura por fatiga con esfuerzo y la longitud de la fisura

Se considerará de forma cualitativa cómo varía la longitud de la fisura por fatiga con el incremento de los esfuerzos cíclicos aplicados utilizando los datos como los obtenidos experimentalmente usando el equipo esquematizado en la figura 7.22. Se usarán varias probetas de un material que contienen una fisura mecánica lateral como se esquematiza en la figura 7.23*a*. Se aplicarán esfuerzos cíclicos de amplitud constante a las probetas, y se medirá el aumento de la longitud de la fisura en función del número de ciclos de esfuerzo aplicados. En la figura 7.23*b* se muestra una gráfica con la variación de la longitud de fisura *versus* el número de ciclos para dos niveles de esfuerzo aplicados a un acero suave.

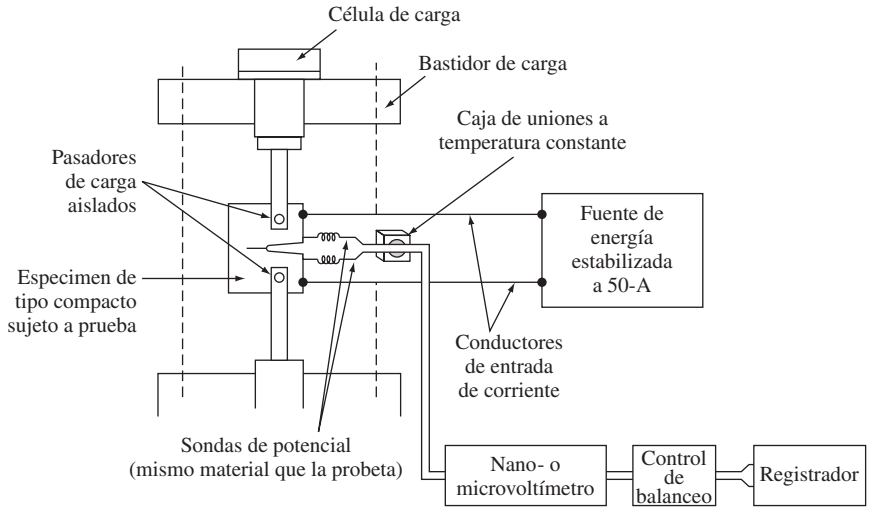


Figura 7.22
Esquema de sistema del sistema de registro de fisura mediante medición del potencial de una corriente eléctrica directa en la prueba de fatiga con alto número de ciclos utilizando una probeta de tipo compacto.
(Según "Metals Handbook", vol. 8, 9a. ed. American Society for Metals, 1985, p. 388.)

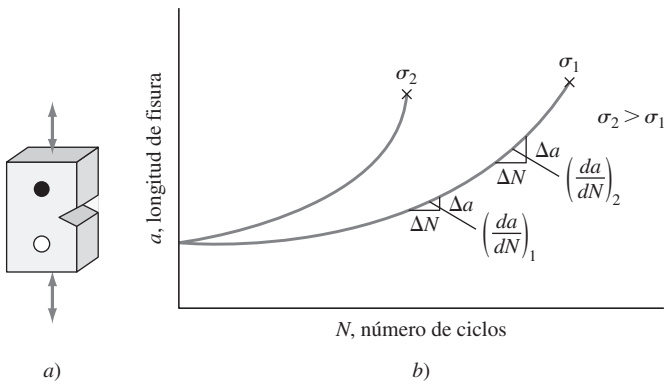


Figura 7.23
a) Probeta en forma de placa delgada con una fisura en el borde sometida a esfuerzo cíclico. *b*) Representación gráfica de la longitud de fisura frente al número de ciclos de esfuerzo para los esfuerzos σ_1 y $\sigma_2 (\sigma_2 > \sigma_1)$.

El examen de las curvas de la figura 7.23*b* indica lo siguiente:

1. Cuando la longitud de la fisura es pequeña, la **velocidad de crecimiento de fisura *da/dN*** es también relativamente pequeña.

2. La velocidad de crecimiento de fisura *da/dN* aumenta con el incremento la longitud de la fisura.

3. Un aumento en el esfuerzo cíclico σ incrementa la velocidad del crecimiento de la fisura.

Por tanto, la velocidad de crecimiento de fisura para materiales sometidos a esfuerzos cíclicos, como las indicadas en la figura 7.23*b*, muestra la siguiente relación:

$$\frac{da}{dN} \propto f(\sigma, a) \tag{7.7}$$

que se traduce así: "la velocidad de crecimiento de fisura *da/dN* varía en función del esfuerzo cíclico aplicado σ y de la longitud de la fisura *a*". Después de numerosas investigaciones, se ha encontrado que para muchos materiales la velocidad de crecimiento de fisura es función del factor de intensidad-esfuerzos *K* (modo I) que proviene de la mecánica de la fractura, el cual a su vez es una función de una combinación de esfuerzo y longitud de fisura. Para muchas aleaciones utilizadas en ingeniería, la velocidad de crecimiento de fisura por fatiga *da/dN* expresada como la diferencial *da/dN* puede relacionarse con el rango de intensidad-esfuerzos ΔK para un esfuerzo de fatiga de amplitud constante, a través de la ecuación:

$$\frac{da}{dN} = A\Delta K^m \tag{7.8}$$

donde da/dN = velocidad de crecimiento de fisura por fatiga, mm/ciclo o pulg/ciclo

ΔK = variación del factor de intensidad-esfuerzos ($\Delta K = K_{máx} - K_{mín}$), MPa$\sqrt{\text{m}}$ o ksi$\sqrt{\text{in}}$

A, m = constantes función del material, medio ambiente, frecuencia, temperatura y relación de esfuerzos

Adviértase que en la ecuación 7.8 se aplica el factor intensidad-esfuerzo K_I (modo I) y no el valor resistencia a la fractura K_{IC}. Por consiguiente, en el esfuerzo máximo del ciclo, el factor de intensidad-esfuerzos $K_{máx} = \sigma_{máx}\sqrt{\pi a}$, y en el esfuerzo mínimo del ciclo, $\Delta K_{mín} = \sigma_{mín}\sqrt{\pi a}$. Para el intervalo del factor de intensidad-esfuerzos ΔK (intervalo) = $K_{máx} - K_{mín} = \Delta K = \sigma_{máx}\sqrt{\pi a} - \sigma_{mín}\sqrt{\pi a} = \sigma_{intervalo}\sqrt{\pi a}$. Dado que el factor de intensidad-esfuerzos no está definido para los esfuerzos de compresión, si $\sigma_{mín}$ está en compresión, a $K_{mín}$ se le asigna un valor de cero. Si existe factor de corrección geométrica *Y* para la ecuación $\Delta K = \sigma_r\sqrt{\pi a}$, entonces $\Delta K = Y\sigma_r\sqrt{\pi a}$.

7.3.2 Representación gráfica de la velocidad de crecimiento de fisuras por fatiga *versus* el factor intensidad-esfuerzos

Por lo general, la longitud de la fisura por fatiga frente a los datos del rango del factor intensidad-esfuerzos se representa gráficamente como log *da/dN* frente a log ΔK. Esto es así dado que en muchos casos en este tipo de escala se obtiene una línea recta o los puntos se ajustan razonablemente bien a una línea recta. La razón básica de este hecho es que los datos experimentales se ajustan muy bien a la expresión *da/dN* en comparación con los datos ΔK que obedecen estrictamente a la relación $da/dN = A\Delta K^m$ y al tomar logaritmos decimales en ambos lados de esta ecuación se obtiene:

$$\log \frac{da}{dN} = \log(A\Delta K^m) \tag{7.9}$$

o bien

$$\log \frac{da}{dN} = m \log \Delta K + \log A \tag{7.10}$$

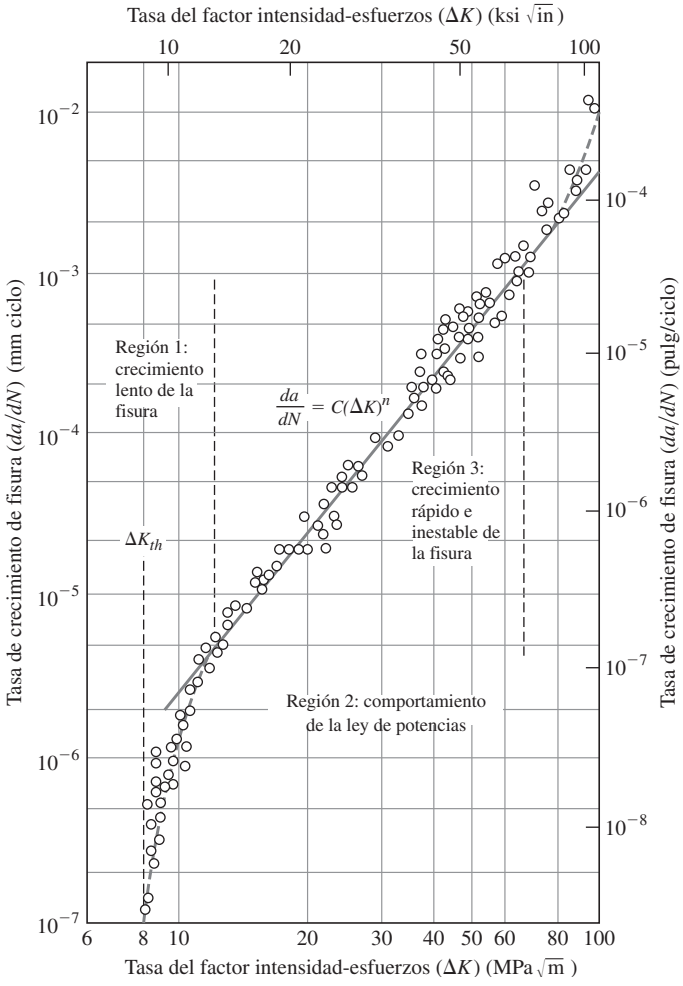


Figura 7.24
Comportamiento del crecimiento de fisura por fatiga en un acero ASTM A533 B1 (esfuerzo de fluencia, 470 MPa [70 ksi]). Condiciones de la prueba: $R = 0.10$: temperatura ambiente del aire, 24°C.
(Según P. C. Paris et al., Stress Analysis and Growth of Cracks, STP513 ASTM, Philadelphia, 1972, pp. 141-176.)

que es la ecuación de una recta del tipo $y = mx + b$. Por consiguiente, de esta representación gráfica, log (da/dN) *versus* log ΔK, se obtiene el valor de la pendiente m.

En la figura 7.24 se muestra un diagrama de velocidad de crecimiento de fisura en comparación a la variación del factor intensidad-esfuerzos para la prueba de fatiga de un acero ASTM A533 B1. El gráfico puede dividirse en tres regiones: la región 1 en la que la velocidad de crecimiento de fisura es muy pequeña, la región 2 en la que la representación gráfica es una recta representada por la ley de potencias $da/dn = A\Delta K^m$, y la región 3 en la cual tiene lugar un crecimiento rápido e inestable de la fisura hasta producir la falla por fatiga. El valor límite de ΔK por debajo del cual el crecimiento de

la fisura no es detectable, se denomina *rango de umbral de factor de intensidad-esfuerzos*, ΔK_{umbral}. Por debajo de este valor no se detecta crecimiento de la fisura debido a la fatiga. El valor de m para el crecimiento de fisura por fatiga da/dN en la región 2 varía usualmente de 2.5 a 6.

7.3.3 Cálculos de los ciclos de resistencia a la fatiga

A menudo, cuando se diseña en ingeniería un nuevo componente utilizando un material en particular, es deseable conocer los ciclos de resistencia a la fatiga del citado componente. Ello puede llevarse a cabo en muchos casos combinando datos de resistencia a la fractura y de velocidad de crecimiento de fisura que generen una expresión útil para predecir los ciclos de resistencia a la fatiga.

Puede obtenerse un tipo de expresión que permita determinar los ciclos de resistencia a la fatiga de un componente integrando la ecuación 7.8, $dA/dN = A\Delta K^m$, entre el tamaño inicial de la fisura (defecto) a_o y el tamaño crítico de la misma a_f, que se produce en la falla por fatiga después de un número de ciclos, N_f.

Se comienza con la ecuación 7.8:

$$\frac{da}{dN} = A\Delta K^m \tag{7.11}$$

Dado que

$$\Delta K = Y\sigma\sqrt{\pi a} = Y\sigma\pi^{1/2}a^{1/2} \tag{7.12}$$

Por tanto

$$\Delta K^m = Y^m\sigma^m\pi^{m/2}a^{m/2} \tag{7.13}$$

Sustituyendo $Y^m\sigma^m\pi^{m/2}a^{m/2}$ de la ecuación 7.13 por ΔK^m de la ecuación 7.11:

$$\frac{da}{dN} = A(Y\sigma\sqrt{\pi a})^m = A(Y^m\sigma^m\pi^{m/2}a^{m/2}) \tag{7.14}$$

Reordenando la ecuación 7.14, se integra la expresión desde el tamaño inicial de la fisura a_o hasta el tamaño crítico de la fisura a_f, y el número de ciclos de fatiga, desde cero hasta N_f. Así,

$$\int_{a_o}^{a_f} da = AY^m\sigma^m\pi^{m/2} \cdot a^{m/2}\int_0^{N_f} dN \tag{7.15}$$

y

$$\int_0^{N_f} dN = \int_{a_o}^{a_f} \frac{da}{A\sigma^m\pi^{m/2}Y^m a^{m/2}} = \frac{1}{A\sigma^m\pi^{m/2}Y^m}\int_{a_o}^{a_f}\frac{da}{a^{m/2}} \tag{7.16}$$

Utilizando la relación

$$\int a^n\,da = \frac{a^{n+1}}{n+1} + c \tag{7.17}$$

e integrando la ecuación 7.16,

$$\int_0^{N_f} dN = N\Big|_0^{N_f} = N_f \tag{7.18a}$$

y para $n = -m/2$,

$$\frac{1}{A\sigma^m\pi^{m/2}Y^m}\int_{a_o}^{a_f}\frac{da}{a^{m/2}} = \frac{1}{A\sigma^m\pi^{m/2}Y^m}\left(\frac{a^{-(m/2)+1}}{-m/2+1}\right)\Bigg|_{a_o}^{a_f} \qquad \textbf{(7.18}b\textbf{)}$$

Así pues,

$$N_f = \frac{a_f^{-(m/2)+1} - a_0^{-(m/2)+1}}{A\sigma^m\pi^{m/2}Y^m[-(m/2)+1]} \qquad m \neq 2 \qquad \textbf{(7.19)}$$

En la ecuación 7.19 se supone que $m \neq 2$ y que Y es independiente del tamaño de fisura, lo que no suele ser usual. Así, la ecuación 7.19 puede ser o no cierta en cuanto a la obtención del valor verdadero de los ciclos de resistencia a la fatiga del componente. Para el caso más general, $Y = f(a)$, el cálculo de N_f tiene que tomar en consideración el cambio de Y, y por tanto ΔK y ΔN deben calcularse para pequeños aumentos sucesivos de longitudes.

PROBLEMA DE EJEMPLO 7.2

Una placa de acero se somete a esfuerzo uniaxial de fatiga a la tensión cíclico de amplitud constante y a esfuerzos de compresión de magnitudes de 120 y 30 MPa, respectivamente. Las propiedades estáticas de la placa son un esfuerzo de fluencia de 1 400 MPa y una resistencia a la fractura K_{IC} de 45 MPa$\sqrt{\text{m}}$. Si la placa contiene una *fisura* lateral de 1.00 mm, ¿cuántos ciclos de fatiga causarán la fractura? Aplique la ecuación $da/dN\,(\text{m/ciclo}) = 2.0 \times 10^{-12}\Delta K^3\,(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^3$. Considere $Y = 1$ en la ecuación de la resistencia a la fractura.

■ Solución

Si se supone para la placa que:

$$\frac{da}{dN}\,(\text{m/ciclo}) = 2.0 \times 10^{-12}\,\Delta K^3\,(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^3$$

Así, $A = 2.0 \times 10^{-12}$, $m = 3$ y $\sigma_r = (120 - 0)$ MPa (dado que no se toman en consideración esfuerzos de compresión) y $Y = 1$.

El tamaño de fisura inicial a_o es igual a 1.00 mm. El tamaño de fisura final a_f se determina mediante la ecuación de la resistencia a la fractura.

$$a_f = \frac{1}{\pi}\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_r}\right)^2 = \frac{1}{\pi}\left(\frac{45\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}}{120\text{ MPa}}\right)^2 = 0.0449\text{ m}$$

Los ciclos de resistencia a la fatiga N_f se determinan mediante la ecuación 7.19:

$$\begin{aligned}
N_f &= \frac{a_f^{-(m/2)+1} - a_o^{-(m/2)+1}}{[-(m/2)+1]A\sigma^m\pi^{m/2}Y^m} \qquad m \neq 2 \\
&= \frac{(0.0449\text{ m})^{-(3/2)+1} - (0.001\text{ m})^{-(3/2)+1}}{(-\frac{3}{2}+1)(2.0 \times 10^{-12})(120\text{ MPa})^3(\pi)^{3/2}(1.00)^3} \\
&= \frac{-2}{(2 \times 10^{-12})(\pi^{3/2})(120)^3}\left(\frac{1}{\sqrt{0.0449}} - \frac{1}{\sqrt{0.001}}\right) \\
&= \frac{-2 \times 26.88}{(2 \times 10^{-12})(5.56)(1.20)^3(10^6)} = 2.79 \times 10^6\text{ ciclos} \blacktriangleleft
\end{aligned}$$

7.4 FLUENCIA Y ESFUERZO DE RUPTURA EN LOS METALES

7.4.1 La fluencia en los metales

Cuando un metal o aleación está bajo una carga o esfuerzo constante, puede sufrir una deformación plástica progresiva después de un tiempo. Esta *deformación dependiente del tiempo* se denomina **fluencia**. La fluencia en los metales y aleaciones es muy importante en algunos diseños en ingeniería, particularmente en aquellos que operan a elevadas temperaturas. Por ejemplo, un ingeniero que seleccione una aleación para los álabes de una turbina de gas de un motor, debe elegir una aleación con muy baja **velocidad de fluencia** puesto que los álabes deben permanecer en servicio durante un largo periodo antes de ser reemplazados por estar próximos a alcanzar la deformación plástica permitida. Para muchos diseños en ingeniería que operan a elevadas temperaturas, la fluencia de los materiales es el factor limitante con respecto a qué tan alta puede ser la temperatura de trabajo.

Considérese la fluencia de un metal policristalino puro a una temperatura por encima de la mitad de su temperatura de fusión $\frac{1}{2}T_M$ (termofluencia o fluencia a alta temperatura). Considérese también un experimento de fluencia en el cual se aplica sobre una probeta recocida una carga constante de suficiente magnitud para causar una deformación considerable debida a la fluencia. Cuando se representa la variación de longitud de la probeta con respecto al tiempo, se obtiene una curva, *curva de fluencia*, como la que se muestra en la figura 7.25.

En la curva de fluencia ideal de la figura 7.25, hay primero una elongación instantánea y rápida del espécimen ϵ_0. Después de ello, el espécimen exhibe fluencia pri-

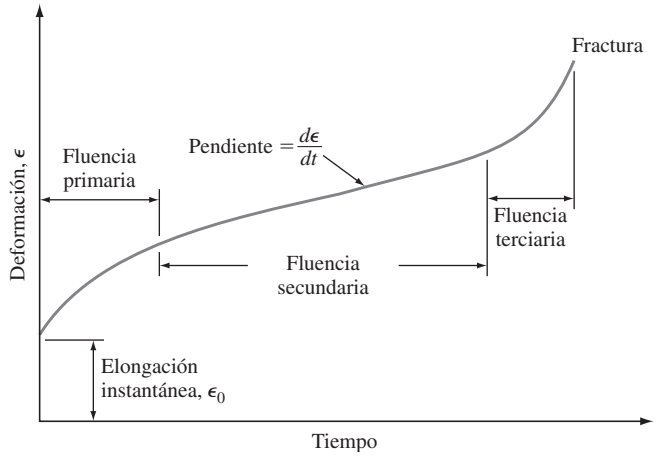


Figura 7.25
Curva típica de fluencia de un metal. La curva representa la deformación del metal o aleación en función del tiempo bajo carga y temperatura constantes. La segunda etapa de fluencia (comportamiento lineal) es la de mayor interés para el ingeniero de diseño debido a que en esas condiciones la fluencia es extensa.

maria durante la cual la velocidad de deformación disminuye con el tiempo. La pendiente de la curva de fluencia ($d\epsilon/dt$ o $\dot{\epsilon}$) se denomina *velocidad de fluencia*. Por tanto, durante la fluencia primaria la velocidad de fluencia disminuye progresivamente con el tiempo. Después tiene lugar una segunda etapa de fluencia en la cual la velocidad de fluencia es esencialmente constante y se conoce como *fluencia en estado estacionario*. Finalmente, en la tercera etapa la velocidad de fluencia aumenta rápidamente con el tiempo hasta alcanzar la fractura. La forma de la curva de fluencia depende de la carga aplicada (esfuerzo) y de la temperatura. A mayores esfuerzos y temperaturas la velocidad de la fluencia aumenta.

Durante la fluencia primaria el metal se endurece por deformación para soportar la carga aplicada y la velocidad de la fluencia disminuye con el tiempo, a medida que el endurecimiento por deformación se vuelve más difícil. A mayores temperaturas (esto es, por encima de $0.5T_M$ para el metal), durante la fluencia secundaria, el proceso de recuperación que involucra dislocaciones de elevada movilidad, se opone al endurecimiento por deformación de manera que el material continúa alargándose (fluencia) a una velocidad en estado estacionario (figura 7.25). La pendiente de la curva de fluencia ($d\epsilon/dt = \dot{\epsilon}$) en la etapa de estado secundario se conoce como *velocidad mínima de fluencia*. Durante la fluencia secundaria, la resistencia del metal o aleación a la fluencia es máxima. Finalmente, para una probeta sometida a carga constante, el proceso de fluencia se acelera en la tercera etapa debido a la estricción de la probeta y también a la formación de huecos, particularmente a lo largo de los límites de grano. En la figura 7.26 se muestra una fractura intergranular de un acero inoxidable del tipo 304L que ha tenido una falla por fluencia.

A bajas temperaturas (esto es, por debajo de $0.4T_M$) y a esfuerzos bajos, los metales muestran una fluencia primaria, y una fluencia secundaria despreciable puesto que la temperatura es demasiado baja para la recuperación de la fluencia por difusión. Sin embargo, si el esfuerzo sobre el metal está por encima de la resistencia máxima a la tensión, el metal se alargará como en una prueba de tensión ordinaria. En general, tanto al aumentar el esfuerzo sobre el metal que está sometido a la fluencia como al aumentar la temperatura, aumenta también la velocidad de la fluencia (figura 7.27).

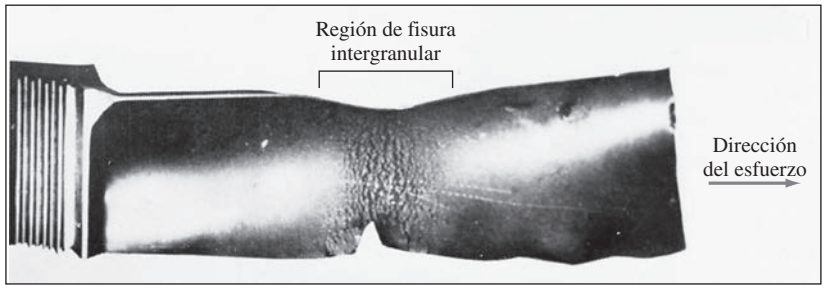


Figura 7.26
Álabe de una turbina de un motor de propulsión en el que se ha producido deformación por fluencia, causando una deformación local y múltiples fisuras intergranulares.
(Según J. Schijve en "Metals Handbook", vol. 10, 8a. ed., American Society for Metals, 1975, p. 23. ASM International.)

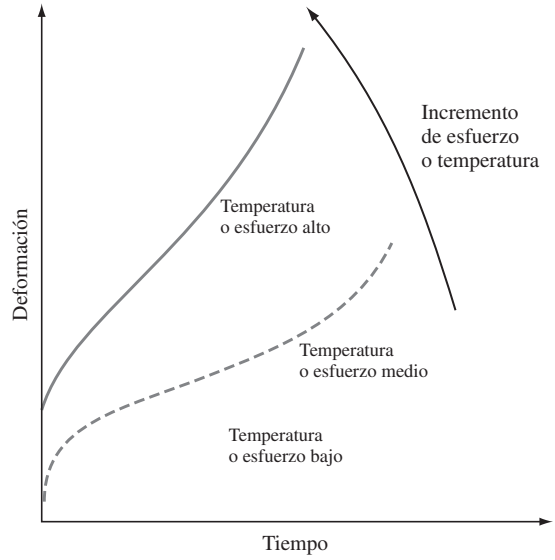


Figura 7.27
Efecto del aumento del esfuerzo en la forma de la curva de fluencia de un metal (esquema). Nótese que cuando el esfuerzo aumenta, la velocidad de deformación aumenta.

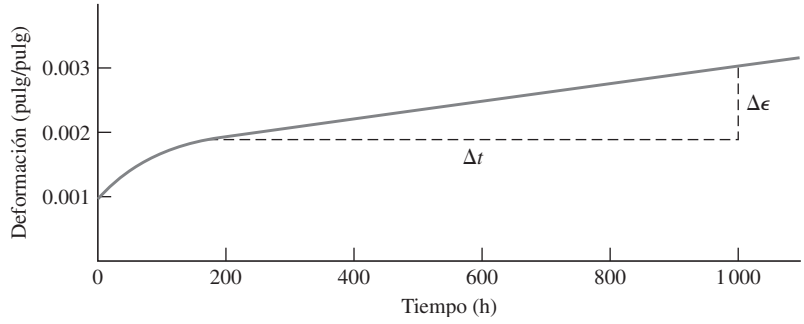


Figura 7.28
Curva de fluencia para una aleación de cobre probada a 225°C y 230 MPa (33.4 ksi). La pendiente de la parte lineal de la curva es la velocidad de fluencia en estado estacionario.

7.4.2 La prueba de fluencia

Los efectos de la temperatura y el esfuerzo sobre la velocidad de fluencia se determinan mediante la prueba de fluencia. Muchas de las pruebas de fluencia se llevan a cabo utilizando diferentes niveles de esfuerzo a temperatura constante o diferentes temperaturas a esfuerzo constante y se dibujan las curvas correspondientes según se muestra en la figura 7.28. La velocidad mínima de fluencia o pendiente de la segunda

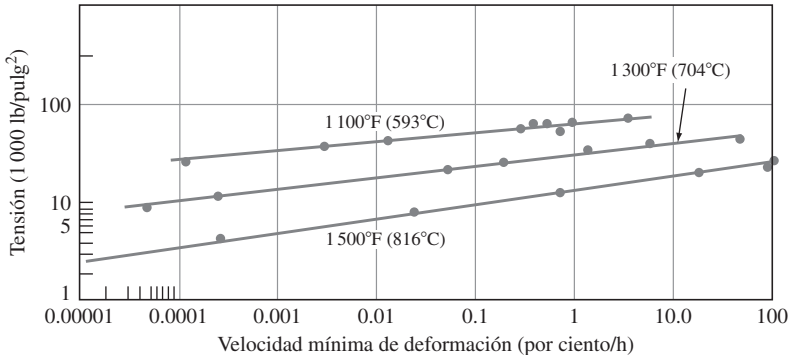


Figura 7.29
Efecto del esfuerzo en la velocidad de fluencia de un acero inoxidable 316 (18% Cr-12% Ni-2.5% Mo) a varias temperaturas (1 100, 1 300, 1 500°F [593, 704, 816°C]).
(Según H. E. McGannon [ed.], "The Making, Shaping, and Treating of Steel", 9a. ed., United States Steel, 1971, p. 1256.)

etapa de la fluencia se mide en cada curva tal como se indica en la figura 7.28. El esfuerzo necesario para producir la mínima velocidad de termofluencia de 10^{-5} por ciento/h a una temperatura determinada, se utiliza para medir la resistencia a la fluencia. En la figura 7.29 se determina por extrapolación el esfuerzo necesario para producir la mínima velocidad de fluencia para el acero inoxidable de tipo 316.

PROBLEMA DE EJEMPLO 7.3

Determine la velocidad de fluencia en estado estacionario de una aleación de cobre cuya curva de fluencia se muestra en la figura 7.28.

■ **Solución**

La velocidad de fluencia en estado estacionario de esta aleación, según la curva de la figura 7.28, se obtiene determinando la pendiente de esta curva en la parte lineal tal como se indica en la figura. Así,

$$\text{Velocidad de termofluencia} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} = \frac{0.0029 - 0.0019}{1\,000 \text{ h} - 200 \text{ h}} = \frac{0.001 \text{ pulg/pulg}}{800 \text{ h}} = 1.2 \times 10^{-6} \text{ pulg/pulg/h} \blacktriangleleft$$

7.4.3 Prueba de ruptura por fluencia

La **prueba de ruptura por termofluencia** o de **esfuerzo a la ruptura** es esencialmente la misma que la prueba de fluencia, excepto que las cargas son mayores y la prueba se lleva a cabo hasta la falla de la muestra. Los datos de fluencia-ruptura se grafican como log del esfuerzo *versus* log del tiempo de ruptura, como se muestra en la figura 7.30. En general, el tiempo al que se produce la ruptura disminuye a medida que aumenta el esfuerzo aplicado y la temperatura. Los cambios de pendiente reflejados en la figura 7.30 se deben a diversos factores como recristalización, oxidación, corrosión o cambios de fase.

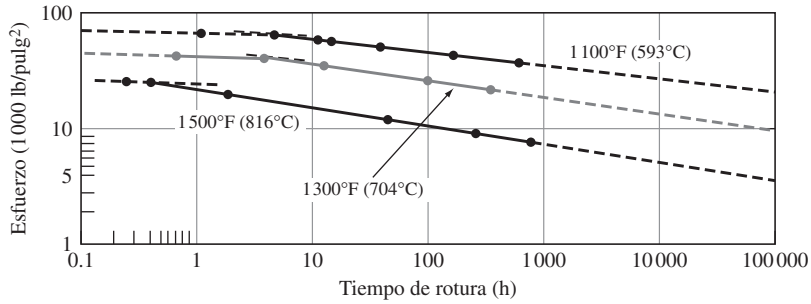


Figura 7.30
Efecto del esfuerzo en el tiempo de ruptura para un acero inoxidable del tipo 316 (18% Cr-12% Ni-2.5% Mo) a varias temperaturas (1 100, 1 300, 1 500°F, [593, 704, 816°C]).
(Según H. E. McGannon [ed.], "The Making, Shaping, and Treating of Steel", 9a. ed., United States Steel, 1971, p. 1257.)

7.5 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE DATOS DE FLUENCIA Y ESFUERZO-TIEMPO DE RUPTURA-TEMPERATURA UTILIZANDO EL PARÁMETRO DE LARSEN-MILLER

Los datos de fluencia-esfuerzo de ruptura para aleaciones resistentes a la termofluencia a elevadas temperaturas se representan usualmente en forma de logaritmo del esfuerzo de ruptura *versus* una combinación del logaritmo del tiempo de ruptura y de la temperatura. Uno de los parámetros tiempo-temperatura más utilizados para representar esta clase de datos es el **parámetro de Larsen-Miller (L.M.)**, el cual en forma generalizada es

$$P(\text{L.M.}) = T[\log t_r + C] \tag{7.20}$$

donde T = temperatura, K o °R
t_r = tiempo de ruptura-esfuerzo, h
C = constante, usualmente del orden de 20

En unidades de kelvin-horas, la ecuación que incluye el parámetro de Larsen-Miller se convierte en:

$$P(\text{L.M.}) = [T(°\text{C}) + 273(20 + \log t_r)] \tag{7.21}$$

En cuanto a unidades Rankine-horas, la ecuación se convierte en:

$$P(\text{L.M.}) = [T(°\text{F}) + 460(20 + \log t_r)] \tag{7.22}$$

De acuerdo con el parámetro de Larsen-Miller para un valor de esfuerzo determinado, el logaritmo del tiempo-esfuerzo de ruptura más una constante del orden de 20 multiplicado por la temperatura en kelvins o grados Rankine permanece constante para un material determinado.

La figura 7.31 compara las gráficas de los parámetros de Miller para el logaritmo del esfuerzo a la ruptura para tres aleaciones tratadas térmicamente resistentes a la ter-

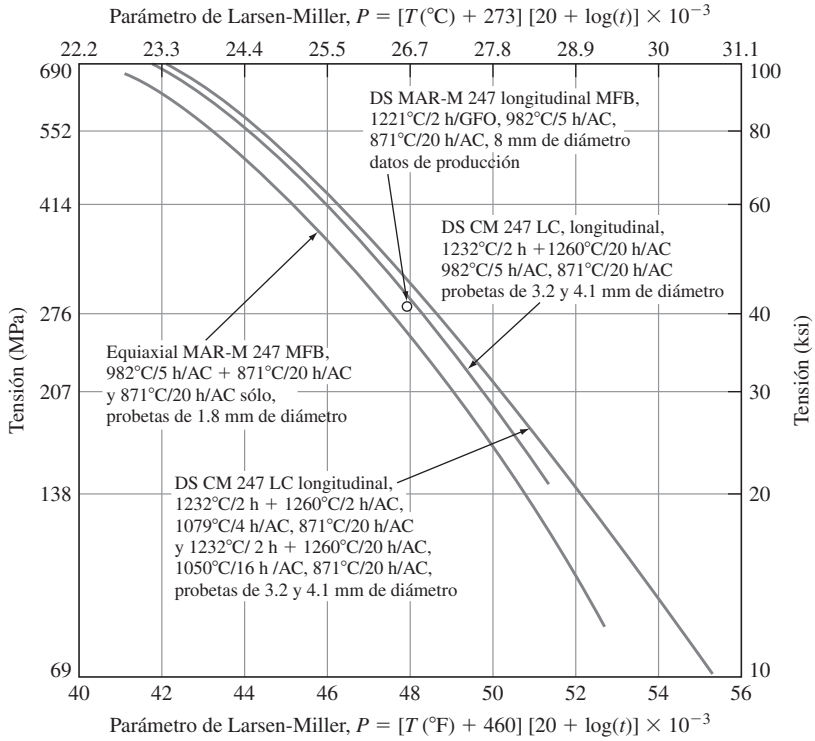


Figura 7.31
Representación del esfuerzo de ruptura frente al parámetro de Larsen-Miller para la aleación CM 247 LC solidificada direccionalmente (DS) en comparación con las aleaciones MAR-M 247 equiaxial y DS. MFB: maquinada a partir del álabe; GFQ: templada con gas; AC: enfriada en aire. *(Según "Metals Handbook", vol. 1, 10a. ed., ASM International, 1990, p. 998.)*

mofluencia. Si dos de las tres variables: tiempo de ruptura, temperatura y esfuerzo son conocidas, la tercera variable puede determinarse del log del esfuerzo *versus* las gráficas del parámetro de L.M. como se muestra en el problema de ejemplo 7.4.

PROBLEMA DE EJEMPLO 7.4

Utilizando la gráfica del parámetro de Larsen-Miller de la figura 7.31 y un esfuerzo de 207 MPa (30 ksi), determine el tiempo de ruptura a 980°C para la aleación CM 247 solidificada direccionalmente (gráfica superior).

■ Solución

A partir de la figura 7.30 a un esfuerzo de 207 MPa, el valor del parámetro de L.M. es 27.8×10^3 K · h. Así:

$$P = T(\text{K})(20 + \log t_r) \quad T = 980°\text{C} + 273 = 1\,253\ \text{K}$$

$$27.8 \times 10^3 = 1\,253(20 + \log t_r)$$

$$\log t_r = 22.19 - 20 = 2.19$$

$$t_r = 155\ \text{h} \blacktriangleleft$$

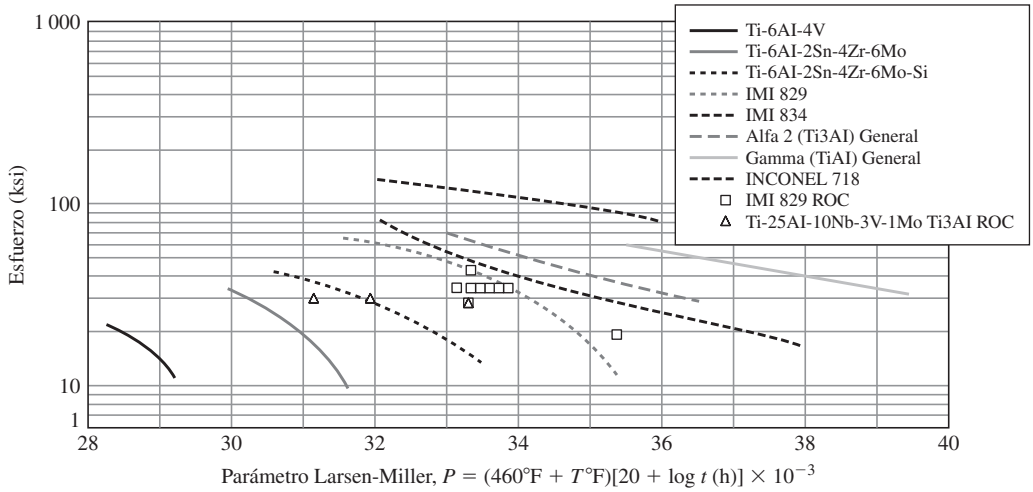


Figura 7.32
Diagrama de Larsen-Miller para una deformación de 0.2%, comparando ROC con IM Ti-829 y ROC Ti-25-10-3-1 con varias aleaciones alfa y beta de importancia comercial. ROC: compactación omnidireccional rápida.
[Según N. R. Osborne et al., SAMPE Quart, (4)22:26(1992).]

En la figura 7.32 se representan varias gráficas del parámetro de Larsen-Miller de un conjunto de datos de deformación por fluencia, por ejemplo, 0.2 por ciento, causada por esfuerzos variables a diferentes tiempos y temperaturas en varias aleaciones de titanio, las cuales también se pueden usar para comparar las propiedades de fluencia de los materiales. El problema de ejemplo 7.5 muestra cómo se determinan el tiempo del esfuerzo, el tiempo de fluencia y la temperatura de fluencia utilizando el logaritmo del esfuerzo *versus* las gráficas del parámetro de Larsen-Miller.

PROBLEMA DE EJEMPLO 7.5

Calcule el tiempo para causar una deformación por fluencia de 0.2 por ciento en un aluminuro de titanio gamma (TiA1) para esfuerzo de 40 ksi y 1 200°F, empleando la figura 7.32.

■ **Solución**

En estas condiciones y utilizando la figura 7.31, $P = 38\,000$. Así,

$$P = 38\,000 = (1\,200 + 460)(\log t_{0.2\%} + 20)$$
$$22.89 = 20 + \log t$$
$$\log t = 2.89$$
$$t = 776 \text{ h} \blacktriangleleft$$

7.6 CASO PARA EL ESTUDIO DE FALLAS EN COMPONENTES METÁLICOS

Debido, entre otras cosas, a defectos de materiales, mal diseño y mal uso, los componentes metálicos fallan ocasionalmente debido a la fatiga por fractura y a la fluencia. En algunos casos, estas fallas ocurren durante las pruebas que los fabricantes aplican

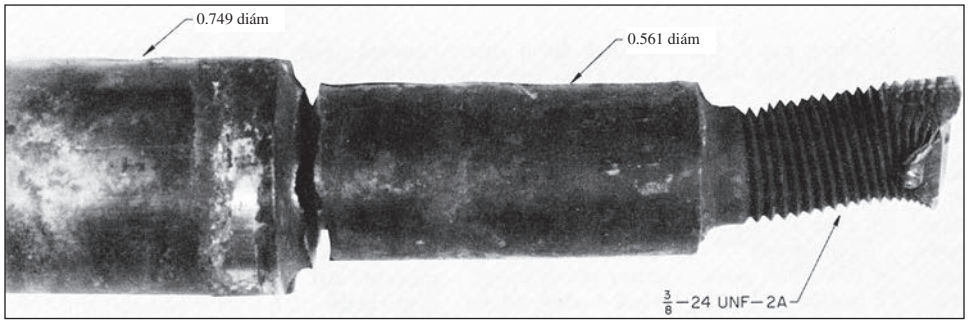


Figura 7.33
Falla prematura del eje de un ventilador (dimensiones en pulgadas).
(ASM Handbook of Failure Analysis and Prevention, vol. 11. 1992. ASM International.)

a los prototipos. En otros casos ocurren cuando el producto ha sido vendido y ya está en uso. Tanto unos como otros justifican un análisis la falla para determinar su causa. En los primeros, la información de la causa puede usarse para mejorar el diseño y la selección de materiales. En los segundos, el análisis de la falla puede ser necesario en parte para determinar el grado de riesgo del componente. En cualquiera de los casos, los ingenieros aplican su conocimiento sobre el comportamiento mecánico de los materiales para realizar el análisis. Los análisis mismos son procedimientos forenses en los que se requiere de documentación y conservación de las pruebas. En el siguiente caso se da un ejemplo.

El primer paso en el proceso de análisis de fallas es determinar la función del componente, las especificaciones exigidas por el usuario, y las circunstancias en que ocurrió la falla. En este caso, se requería un eje de apoyo para el activador de un ventilador fabricado con acero 1040 o 1050 estirado en frío con un esfuerzo de fluencia de 586 MPa. La vida esperada del eje se estimaba en 6 440 km. Sin embargo, el eje se fracturó después de sólo 3 600 km de servicio (figura 7.33).

La investigación suele comenzar con el examen visual del componente que falló. Durante el examen visual preliminar, debe tenerse cuidado de proteger la superficie de la fractura de cualquier daño adicional. No debe intentarse empatar las superficies de fractura, puesto que ello podría introducir un daño en la superficie que podría influir indebidamente en cualquier análisis posterior. En el caso del eje activador del ventilador, la investigación reveló que la fractura había comenzado en dos puntos muy cerca de una arista en la región donde se da un cambio abrupto del diámetro del eje. Los dos puntos de inicio se hallaban separados por una distancia de alrededor de 180 grados (figura 7.34). Con base en el análisis visual de la superficie, los investigadores determinaron que las fracturas se propagaron desde los dos puntos de inicio hacia el centro del eje, donde ocurrió la fractura catastrófica final. Dada la simetría de los dos puntos de inicio y del dibujo de marcas de playa observados en la superficie, los investigadores llegaron a la conclusión de que la fractura era típica de la fatiga por flexión alternada. Se creyó que la causa de la fractura fue una combinación de pandeos cíclicos alternados y un radio de arista afilado (*generación de esfuerzo*).

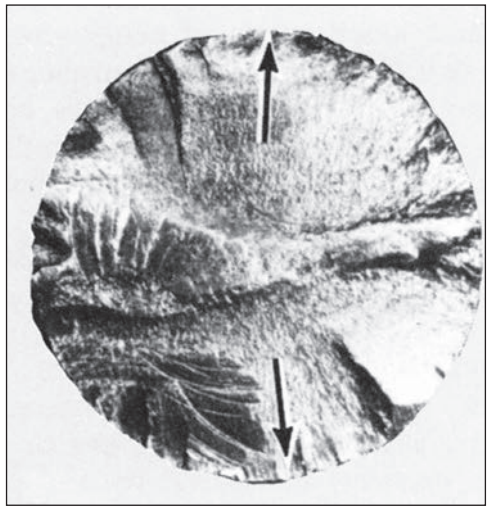


Figura 7.34
Fractura superficial que muestra los orígenes de la fractura situados simétricamente. Obsérvese la región central en donde ocurrió la fractura final. *(ASM International.)*

Después de terminada la inspección visual y todos los exámenes no destructivos, se realizaron otras pruebas más invasivas e incluso destructivas. Por ejemplo, el análisis químico del material del eje reveló que, de hecho, era acero 1040 como lo requería el usuario. Los investigadores pudieron maquinar a partir del centro del eje fracturado un espécimen para la prueba de tensión. La prueba de tensión reveló que las resistencias a la tensión y a la fluencia del metal fueron de 631 y 369 MPa, respectivamente, con una elongación en la fractura de 27 por ciento. La resistencia a la fluencia del material del eje (369 MPa) era considerablemente menor al requerido por el usuario (586 MPa). Un posterior examen metalográfico reveló que la estructura de grano era predominantemente equiaxial. Recuérdese lo expuesto en el capítulo anterior en el sentido de que el trabajo en frío aumenta la resistencia a la fluencia, reduce la ductilidad y produce una estructura de grano que en general no es equiaxial sino alargada. La menor resistencia a la fluencia, la ductilidad relativamente alta y la naturaleza equiaxial de la microestructura, revelaron que el acero 1040 empleado en la fabricación de este eje no fue estirado en frío como lo especificó el usuario. De hecho, las pruebas sugieren que el material fue laminado en caliente.

El empleo de acero laminado en caliente (con un límite de fatiga menor) junto con el efecto generador de esfuerzos de la arista filosa causó la falla del componente bajo carga de flexión alternada. Si el componente se hubiera fabricado con acero 1040 estirado en frío (con un límite de fatiga superior en 40 por ciento), se habría evitado o retrasado la fractura. El estudio del caso muestra la importancia que tiene el conocimiento del ingeniero acerca de las propiedades del material, las técnicas de elaboración, el tratamiento térmico y la selección para el diseño y funcionamiento exitosos de los componentes.

7.7 ADELANTOS RECIENTES Y PERSPECTIVAS EN LA OPTIMIZACIÓN DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE METALES

En los capítulos anteriores se han expuesto brevemente algunas de las atractivas características estructurales de los materiales nanocristalinos, tales como la alta resistencia, mayor dureza y mejor resistencia al desgaste. Sin embargo, todas estas propiedades apenas tendrían un valor científico anecdótico si la tolerancia a la ductilidad, fractura y daño de estos materiales no cumplieran niveles aceptables para aplicaciones concretas. En los siguientes párrafos se expondrá el conocimiento y los avances actuales relativos a las propiedades de los metales nanocristalinos mencionadas. Debe señalarse que la información que existe acerca de la conducta de estos metales es limitada y que es necesaria una mayor investigación para establecer un nivel de comprensión comparable con el que se tiene de los metales microcristalinos.

7.7.1 Optimización simultánea de la ductilidad y la resistencia

El cobre puro en su estado recocido y de grano muestra una ductilidad a la tensión de hasta 70 por ciento, pero muy baja resistencia a la fluencia. La forma nanocristalina del cobre puro, con tamaño de grano menor de 30 nm, posee esfuerzo de fluencia considerablemente mayor, pero con una ductilidad a la tensión de menos de 5 por ciento. Las primeras pruebas indican que esta tendencia es típica de los metales nanocristalinos con estructura FCC como el cobre y el níquel. No se ha establecido aún una tendencia similar para los metales nanocristalinos BCC ni HCP; por el contrario, el Co nanocristalino (HCP) muestra una elongación a tensión comparable a la del Co microcristalino. Los metales nanocristalinos FCC son considerablemente más frágiles que sus contrapartes microcristalinas. Esto se ilustra esquemáticamente en la figura 7.35. En esta figura la curva *A* muestra el comportamiento de la curva esfuerzo-deforma-

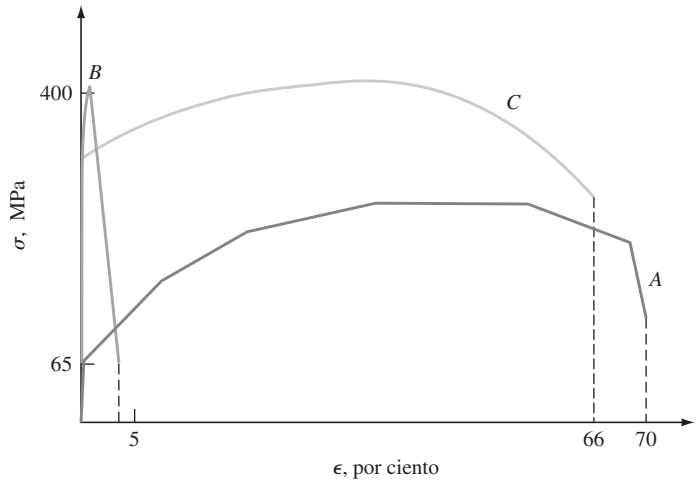


Figura 7.35
Esquema de diagramas de deformación por esfuerzo para cobre puro microcristalino (curva *A*), nanocristalino (curva *B*) y de grano mixto (curva *C*).

ción del cobre microcristalino recocido. Se observa esfuerzo de fluencia de aproximadamente 65 MPa y una ductilidad de alrededor de 70 por ciento. La curva *B* representa al cobre nanocristalino con un mayor esfuerzo de fluencia, de alrededor de 400 MPa, y una ductilidad de menos de 5 por ciento. La tenacidad de cada metal puede determinarse mediante el cálculo del área bajo la correspondiente curva de esfuerzo-deformación. Queda claro a partir de esta figura que la tenacidad del cobre nanocristalino es considerablemente menor. La reducción de la ductilidad y, por lo tanto de la tenacidad, se ha atribuido a la formación de bandas localizadas de deformación llamadas *bandas de corte*. En ausencia de actividad de dislocación en el nanograno (debido al tamaño extremadamente pequeño), el grano no se deforma de manera convencional; en lugar de ello, la deformación se localiza en diminutas bandas de corte que, a la larga, se fracturan sin deformación considerable en el resto del grano. En consecuencia, las ganancias extraordinarias en esfuerzo de fluencia se vuelven inefectivas dado que los bajos niveles de ductilidad producen una menor tenacidad y, por consiguiente, las aplicaciones prácticas de estos materiales son mínimas.

Por fortuna, recientemente los científicos han logrado producir cobre nanocristalino con ductilidad comparable a la de su contraparte microcristalina. Esto se logra mediante un complejo proceso de conformación termomecánica que incluye una serie de laminados en frío de la muestra a la temperatura del nitrógeno líquido con enfriamiento adicional después de cada pasada, seguido por un proceso de recocido muy controlado. El material resultante contiene alrededor de 25 por ciento de granos de tamaño micrométrico en una matriz de granos a escala de nanómetros y ultrafinos (figura 7.36).

El proceso de laminado en frío a temperatura del nitrógeno líquido permite la formación de una amplia densidad de dislocaciones. La baja temperatura no permite la recuperación de las dislocaciones y, a su vez, causa el aumento de la densidad a niveles más allá de los alcanzables a temperatura ambiente. En esta etapa, la muy deformada muestra tiene una mezcla de estructura de grano nanocristalina y ultrafina. La muestra se recuece en condiciones muy reguladas. El proceso de recocido permite la

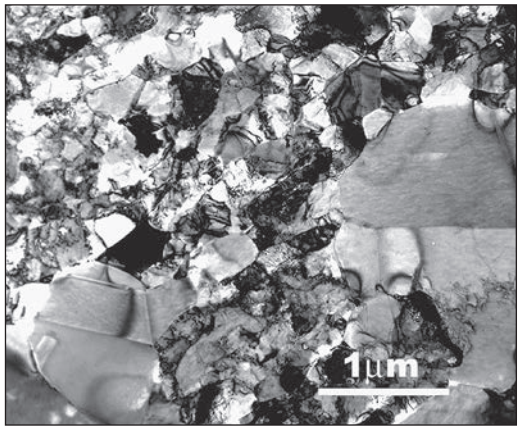


Figura 7.36
Micrografía TEM que muestra la mezcla de granos de tamaño micro, ultrafino y nano de cobre puro.
(Y. M. Wang, M. W. Chen, F. Zhou, E. Ma, Nature, vol. 419, octubre de 2002: figura 3b.)

recristalización y crecimiento de algunos granos a un intervalo de 1 a 3 μm (denominado *crecimiento anormal de grano* o *recristalización secundaria*). La existencia de granos grandes permite un nivel elevado de actividad de dislocación y maclado y, por lo tanto, la deformación en todo el material, mientras que los granos de tamaño predominantemente nano y ultrafino mantienen un alto esfuerzo de fluencia. Este cobre posee tanto resistencia a la fluencia como ductilidad altas y, por consiguiente, alta tenacidad, como se presenta esquemáticamente en la curva *C* de la figura 7.35. Además de estos novedosos procesos de formación termomecánica que permiten mayor tenacidad de materiales nanocristalinos, algunos esfuerzos de investigación han mostrado que la síntesis de materiales nanocristalinos bifásicos puede producir mejor ductilidad y tenacidad. Estos adelantos tecnológicos son fundamentales para facilitar la aplicación de los nanomateriales en diversos campos.

7.7.2 Comportamiento de fatiga en metales nanocristalinos

Los primeros experimentos de fatiga en níquel puro nanocristalino (de 4 a 20 nm), ultrafino (300 nm) y microcristalino a una velocidad de carga *R* de cero (cero-tensión-cero) y una frecuencia de ciclos de 1 Hz, han mostrado un efecto considerable en su respuesta a la fatiga *SN*. Tanto el níquel nanocristalino como el ultrafino muestran un aumento en el intervalo del esfuerzo a la tensión ($\sigma_{máx} - \sigma_{mín}$) en el cual se alcanza el límite de vida útil (definido como 2 millones de ciclos) al compararlo con el níquel microcristalino. El níquel nanocristalino muestra un aumento ligeramente mayor que el níquel ultrafino. Sin embargo, los experimentos de crecimiento de fisura por fatiga en los que se emplean especímenes de níquel con muesca en la orilla con el mismo tamaño de grano que se menciona antes, muestran un cuadro distinto. Estos experimentos demuestran que el crecimiento de fisura por fatiga aumenta en el régimen intermediario con una disminución de tamaño de grano. Además, se observa un umbral inferior de crecimiento de fisura por fatiga K_{umbral}, para el metal nanocristalino. En general, los resultados muestran efectos beneficiosos y perjudiciales simultáneos sobre el desempeño de la fatiga de los materiales con tamaño de grano a escala nano.

Queda claro a partir de la breve sinopsis anterior, que debe hacerse una gran investigación para comprender el comportamiento de estos materiales y poder emplearlos en las aplicaciones requeridas por varias industrias. Estos materiales son potencialmente extraordinarios por lo que impulsan los esfuerzos para hallar las respuestas.

7.8 R E S U M E N

La fractura durante el servicio de los componentes metálicos es de gran importancia y tiene consecuencias igualmente importantes. La selección adecuada de un material para manufacturar un componente constituye un paso crítico para evitar fallas no deseadas. La fractura de los metales se puede clasificar como dúctil o frágil. Esto se determina fácilmente efectuando pruebas sencillas de tensión estática. La fractura dúctil está acompañada de una deformación plástica notable antes de la falla. Por el contrario, en la fractura frágil aparece o no una pequeña deformación siendo por ello más problemática. En algunos casos estando bajo altas velocidades de carga o a bajas temperaturas, los materiales que originalmente son dúctiles se comportan de manera frágil a lo cual se le llama transición dúctil a frágil. Por ello debe tenerse mucho cuidado al seleccionar los materiales con los que se fabricarán componentes que vayan a operar a bajas temperaturas.

Dado que los defectos como microfisuras debilitan un material, los ingenieros aplican este concepto de resistencia a la fractura con base en fisuras que puedan preexistir (mecánica de fractura) para diseñar componentes más seguros. El concepto de factor de intensidad-esfuerzo, K, en la punta de una fisura se emplea para representar el efecto combinado del esfuerzo en la punta de la fisura y en la longitud de ésta.

La falla de los componentes metálicos sometidos a una carga cíclica o repetida llamada falla por fatiga es de enorme importancia para los ingenieros. Su importancia se debe al bajo nivel de esfuerzos a los cuales ocurren dichas fallas, a la naturaleza oculta del daño (dentro del material) y a su falla repentina y abrupta. Otra forma de falla que ocurre a altas temperaturas y carga constante se llama termofluencia, que se define como la deformación plástica progresiva durante un periodo. Los ingenieros están muy conscientes de estas fallas y aplican altos factores de seguridad para protegerse de las mismas.

Los ingenieros y científicos están buscando siempre materiales nuevos que ofrezcan mayor resistencia, ductilidad, resistencia a la fatiga y sean en general resistentes a las fallas. Los materiales nanocristalinos prometen ser los materiales de elección para el futuro, al ofrecer una combinación de propiedades que mejorarán en gran medida la resistencia de un material a la fractura. Sin embargo, los especialistas en la ciencia de los materiales deben realizar más investigaciones para alcanzar esta meta.

7.9 DEFINICIONES

Sección 7.1

Fractura dúctil: modo de fractura caracterizado por una lenta propagación de la fisura. Las superficies de los metales con fractura dúctil son usualmente sin brillo con apariencia fibrosa.

Fractura frágil: modo de fractura caracterizado por una rápida propagación de la fisura. Las superficies de los metales con fractura frágil son normalmente brillantes con apariencia granular.

Transición dúctil a frágil (TDF): menor ductilidad y resistencia a la fractura observadas en un material cuando la temperatura es baja.

Sección 7.2

Fatiga: fenómeno que conduce a la fractura de un material sometido a esfuerzos repetidos cuya resistencia es inferior a la resistencia máxima del material.

Falla por fatiga: la falla que tiene lugar en un componente en el que aparecen fracturas cuando está sometido a ciclos de fatiga o bien cuando ve sensiblemente reducida su rigidez.

Ciclos de resistencia a la fatiga: número de ciclos de esfuerzo o deformación que experimenta un componente antes de que se produzca la falla.

Sección 7.3

Velocidad de crecimiento de fisura por fatiga *da/dN*: velocidad de crecimiento de la fisura causada por una carga de fatiga de amplitud constante.

Sección 7.4

Fluencia: deformación dependiente del tiempo de un material sometido a carga o esfuerzo constante.

Velocidad de la fluencia: pendiente de la curva de fluencia-tiempo para un tiempo determinado.

Fluencia (esfuerzo)-resistencia a la ruptura: el esfuerzo que puede causar la fractura en una prueba de fluencia (esfuerzo de ruptura) en un tiempo dado en un ambiente específico y a una temperatura particular.

Sección 7.5

Parámetro de Larsen-Miller: parámetro de tiempo-temperatura empleado para predecir la ruptura por esfuerzo debido a la fluencia.

7.10 PROBLEMAS

Las respuestas a los problemas marcados con un asterisco se encuentran al final del libro.

7.1 ¿Cuáles son las características superficiales de una fractura dúctil de un metal?

7.2 Describa las tres etapas que se dan en la fractura dúctil de un metal.

7.3 ¿Cuáles son las características superficiales de una fractura frágil de un metal?

7.4 Describa las tres etapas en la fractura frágil de un metal.

7.5 Describa la prueba de impacto que utiliza una probeta Charpy con muesca en V.

7.6 ¿Cómo afecta el contenido de carbono en un acero al carbono ordinario al intervalo de temperatura de transición dúctil-frágil?

***7.7** Determine la longitud de fisura para una fisura contenida en una placa de aleación de aluminio 7075-T751 sometida a una tensión uniaxial. Para esta aleación $K_{IC} = 22.0\ \text{ksi}\sqrt{\text{in}}$ y $\sigma_f = 82.0$ ksi. Considere que $Y = \sqrt{\pi}$.

7.8 Determine la longitud de fisura crítica para una fisura contenida en una placa de aleación de aluminio 7150-T651 sometida a esfuerzo uniaxial. Para esta aleación $K_{IC} = 25.5\ \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ y $\sigma_f = 400$. Considere que $Y = \sqrt{\pi}$.

***7.9** El factor de intensidad de esfuerzo crítica (K_{IC}) de un material utilizado en el diseño de un componente es de $23.0\ \text{ksi}\sqrt{\text{in}}$. ¿Cuál es el valor del esfuerzo que conduce a la fractura si el componente contiene una fisura interna de 0.13 pulgadas? Considere que $Y = 1$.

7.10 ¿Cuál es el tamaño máximo (mm) de una fisura interna contenida en una placa de aleación de aluminio 7075-T651 que puede soportar una esfuerzo de *a*) las tres cuartas partes del esfuerzo de fluencia y *b*) la mitad del esfuerzo de fluencia? Considere $Y = 1$.

7.11 Una placa de aleación contiene una fisura interna de 1.90 mm. ¿Cuál es el máximo esfuerzo (MPa) que puede soportar el material sin que se produzca una fractura catastrófica? Considere $Y = \sqrt{\pi}$.

***7.12** Utilizando la ecuación $K_{IC} = \sigma_f\sqrt{\pi a}$, represente gráficamente al esfuerzo de fractura (MPa) para una aleación de aluminio 7075-T651 respecto al tamaño de la fisura superficial a (mm) para valores de a entre 0.2 mm y 2.0 mm. ¿Cuál es el tamaño mínimo de la fisura que producirá la fractura de tipo catastrófico?

***7.13** Determine la longitud de fisura crítica (mm) para una fisura contenida en una placa de aleación de aluminio 2024-T6 que tiene una $K_{IC} = 23.5\ \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ y está sometida a un esfuerzo de 300 MPa. Considere $Y = 1$.

7.14 Describa la falla por fatiga en un metal.

***7.15** ¿Cuáles son los dos tipos de áreas superficiales que se observan normalmente en la superficie de un material que ha fallado por fatiga?

7.16 ¿Dónde se originan usualmente las fallas por fatiga en una sección metálica?

7.17 ¿Cómo es la prueba de fatiga que permite obtener las curvas *SN*, y qué datos se obtienen de las mismas?

7.18 ¿Qué diferencia presenta la curva *SN* para un acero al carbono de la curva correspondiente a una aleación de aluminio de alta resistencia?

***7.19** Se ha llevado a cabo una prueba de fatiga con un esfuerzo máximo de 25 ksi (172 MPa) y un esfuerzo mínimo de −4.00 ksi (−27.6 MPa). Calcule *a*) el rango del esfuerzo, *b*) la amplitud del esfuerzo, *c*) el esfuerzo medio y *d*) la relación de esfuerzos.

7.20 Se ha llevado a cabo una prueba de fatiga con un esfuerzo medio de 17 500 psi (120 MPa) y una amplitud de esfuerzo de 24 000 psi (165 MPa). Calcule *a*) los esfuerzos máximo y mínimo, *b*) la relación de esfuerzos y *c*) el rango de esfuerzos.

7.21 Describa los cuatro cambios estructurales básicos que tienen lugar cuando un metal dúctil homogéneo falla por fatiga bajo esfuerzos cíclicos.

7.22 Describa los cuatro factores principales que afectan la resistencia a la fatiga de un metal.

7.23 Una gran placa plana se somete a esfuerzos cíclicos de tensión y compresión uniaxiales de amplitud constante de 120 y 35 MPa, respectivamente. Si antes de la prueba la mayor fisura superficial es de 1.00 mm y la resistencia a la fractura en condiciones de deformación plana es de 35 MPa$\sqrt{\text{m}}$, estime el número de ciclos de resistencia a la fatiga de la placa como el número de ciclos que conduce a la falla. Para la placa, $m = 3.5$ y $A = 5.0 \times 10^{-12}$ en MPa y en unidades métricas. Considere $Y = 1.3$.

***7.24** Lo mismo que en el problema 7.23, pero con un esfuerzo a la tensión de 70 MPa. Si las longitudes de fisura inicial y crítica son, respectivamente, de 1.25 mm y 12 m en la placa y el número de ciclos de resistencia a la fatiga es de 2.0×10^6 ciclos, calcule el esfuerzo máximo a la tensión en MPa que conduce el citado valor del número de ciclos de resistencia a la fatiga. Considere $m = 3.0$ y $A = 6.0 \times 10^{-13}$ MPa y en unidades métricas. Considere $Y = 1.20$.

7.25 Lo mismo que en el problema 7.23. Determine la longitud crítica de fisura superficial si el número de ciclos de resistencia a la fatiga tiene que ser de 7.0×10^5 ciclos. Considere que el tamaño de fisura inicial es de 1.80 mm y que el valor máximo del esfuerzo a la tensión es de 160 MPa. Considere asimismo $m = 1.8$ y $A = 7.5 \times 10^{-13}$ MPa y unidades métricas. Considere $Y = 1.25$.

***7.26** Lo mismo que en el problema 7.23. Determine el tamaño crítico de fisura superficial si el número de ciclos de resistencia a la fatiga tiene que ser de 8.0×10^6 ciclos y el esfuerzo máximo a la tensión de 21 000 psi. Considere $m = 3.5$ y $A = 4.0 \times 10^{-11}$ ksi y pulg. El tamaño de fisura inicial (en la arista) es de 0.120 pulg. Considere asimismo $Y = 1.15$.

7.27 ¿Qué se entiende por fluencia en un metal?

7.28 ¿Qué condiciones ambientales son especialmente importantes en la fluencia de los metales desde el punto de vista industrial?

7.29 Dibuje una curva de fluencia típica obtenida bajo carga constante y a temperatura relativamente elevada e indique en ella las tres etapas que se observan durante la fluencia.

7.30 Los siguientes datos de fluencia se obtuvieron para una aleación de titanio a 50 ksi y 400°C. Represente gráficamente la deformación por fluencia respecto al tiempo (horas) y determine la velocidad de fluencia en estado estacionario para estas condiciones de prueba.

Deformación (pulg/pulg)	Tiempo (h)	Deformación (pulg/pulg)	Tiempo (h)
0.010×10^{-2}	2	0.075×10^{-2}	80
0.030×10^{-2}	18	0.090×10^{-2}	120
0.050×10^{-2}	40	0.11×10^{-2}	160

***7.31** Una aleación de grano MAR-M 247 soporta un esfuerzo de 276 MPa (figura 7.31). Determine el tiempo para que ocurra la ruptura a 850°C.

7.32 Una aleación MAR-M 247 (figura 7.31) soporta un esfuerzo de 207 MPa. ¿A qué temperatura (°C) el tiempo de ruptura por esfuerzo será de 210 h?

***7.33** Si una aleación CM 247 LC (figura 7.31, gráfica de en medio) se somete a una temperatura de 960°C durante tres años, ¿cuál es el esfuerzo máximo que podrá soportar sin que se produzca la ruptura?

***7.34** Una aleación de Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo se somete a un esfuerzo de 20 000 psi. ¿Cuánto tiempo podrá estar en servicio la citada aleación bajo dicho esfuerzo a 500°C sin que la deformación experimentada por la fluencia supere al 0.2%? Utilice la figura 6.37.

7.35 El aluminuro de titanio se somete a un esfuerzo de 50 000 psi. Si la deformación por fluencia del material debe limitarse al 0.2%, ¿cuánto tiempo podrá estar en servicio este material a 1 100°F? Utilice la figura 7.32.

7.11 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. Partiendo de una barra de latón de 2 pulgadas de diámetro, se quiere procesar barras de 0.2 pulgadas que tengan un esfuerzo de fluencia mínimo de 20 ksi y una elongación porcentual a fractura de 10 por ciento (véase figura 6.46). Diseñe un proceso para lograrlo. (Indicación: La reducción de diámetro directa desde 2 hasta 0.2 pulgadas no es posible. ¿Por qué?)

2. Un equipo de detección de fisuras por ultrasonidos utilizado por la compañía A puede detectar fisuras de longitud igual o superior a 0.10 pulgadas. Debe diseñarse y manufacturarse un componente ligero y ser inspeccionado posteriormente utilizando el citado equipo de ultrasonidos. El esfuerzo uniaxial máximo aplicado sobre el componente es de 60 ksi. Las opciones para escoger a los metales son Al 7178 T651, Ti-6Al-4V, aleación o acero 4340, las cuales aparecen en la tabla 7.1. *a*) ¿Qué aleación escogería usted para tener el mayor margen de seguridad (utilice $Y = 1.0$)? *b*) ¿Qué metal escogería cuando se consideran tanto la seguridad como el bajo peso?

3. En el problema 2, si no se considera la presencia de fisuras y sólo se toma en cuenta la fluencia como criterio de falla, ¿cuál sería el metal elegido para que no se deforme plásticamente bajo las citadas condiciones y que resulte en el diseño más ligero (utilice la tabla 7.1)?

4. Una placa de acero se somete a un esfuerzo de tensión de 120 MPa. La tenacidad a la estructura del material es de 45 MPa$\sqrt{\text{m}}$. *a*) Determine el tamaño de fisura crítica para que la placa no falle bajo condiciones estáticas de carga (considere $Y = 1$). *b*) Considere la misma placa bajo esfuerzos cíclicos tensión/compresión de 120 MPa y 30 MPa, respectivamente. Si el componente debe mantenerse en servicio durante tres millones de ciclos, ¿cuál es la mayor longitud de fisura permitida? y *c*) compare los datos de longitud de fisura críticos de las partes *a*) y *b*). ¿Qué conclusiones se obtienen?

5. Una barra cilíndrica fabricada con aleación CM 247 solidificada direccionalmente va a cargar 10 000 N a una temperatura de 900°C, durante 300 h. Utilizando la gráfica del parámetro de Larsen-Miller de la figura 7.31, determine las dimensiones apropiadas para la sección transversal de la barra.

6. En la fabricación de bielas se usa el acero 4340 tratable térmicamente hasta obtener una resistencia de 260 ksi. Para dicha fabricación existen dos opciones *a*) tratamiento térmico y su utilización y *b*) tratamiento térmico y pulido de superficie. ¿Qué opción debería escogerse y por qué?

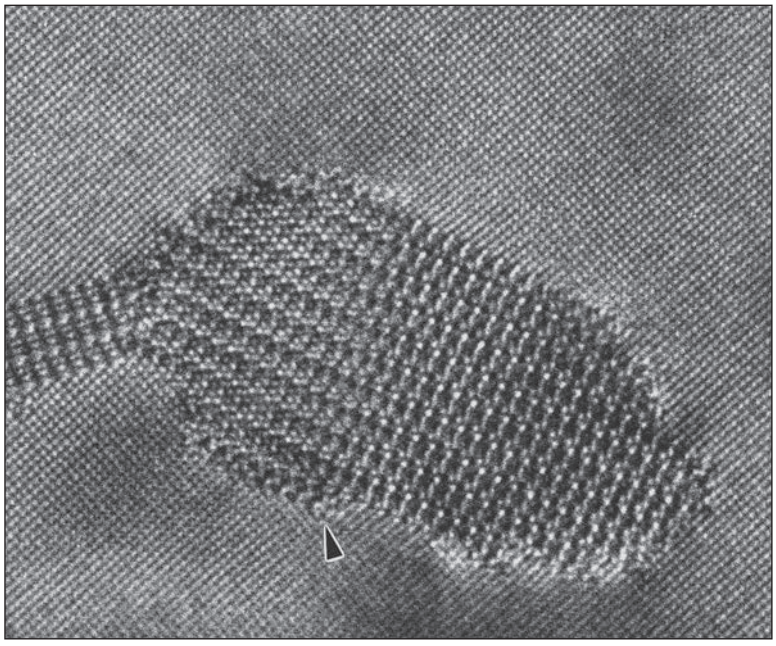
7. En aplicaciones aeronáuticas, los paneles de aluminio se remachan a través de agujeros taladrados en las mismas. Es práctica habitual en la industria expandir en frío los agujeros al diámetro deseado. *a*) Expliqué por qué se lleva a cabo dicho proceso y cómo beneficia a la estructura. *b*) Diseñe un sistema que permita lograr este proceso de forma efectiva y barata. *c*) ¿Qué precauciones deben tomarse durante dicho proceso de expansión en frío?

8. ¿Qué factores deben tomarse en consideración en la selección de materiales para fabricar monedas? Sugiera materiales para esta aplicación.

9. El ruido en cañerías de sistemas de drenaje y de desecho de líquidos es resultado, en general, de la vibración del sistema y del ruido provocado por el aire circulante. ¿Qué material podría seleccionarse para el sistema de tuberías con objeto de reducir la vibración y el ruido? ¿Por qué?

CAPÍTULO 8

Diagramas de fase



(Según W. M. Rainforth, "Opportunities and pitfalls in characterization of nanoscale features", Materials Science and Technology, vol. 16 (2000) 1349-1355.)

El endurecimiento por precipitación o maduración es un proceso de tratamiento térmico utilizado para producir una mezcla de fases duras distribuidas uniformemente en una matriz blanda. La fase de precipitado interfiere con el movimiento de las dislocaciones y, como resultado de ello, endurece a la aleación. La figura que abre el capítulo es una imagen de microscopio electrónico de alta resolución de la fase Al_2CuMg en una matriz de aluminio.[1]

En un material, una **fase** es una región que difiere en su microestructura y/o composición, de otra región. Los *diagramas de fase* son representaciones gráficas de las fases que existen en un sistema de materiales a varias temperaturas, presiones y composiciones. Los diagramas, en su mayoría, se han construido en condiciones de equilibrio,[2] y son utilizados por ingenieros y científicos para entender y predecir muchos aspectos del comportamiento de los materiales. ■

[1] http://www.shef.ac.uk/uni/academic/D-H/em/research/centres/sorbcent.html

[2] Los **diagramas de equilibrio de fases** se determinan mediante la aplicación de condiciones de enfriamiento lento. En la mayoría de los casos se consigue una aproximación al equilibrio, pero nunca se alcanza completamente.

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Describir el equilibrio, fase y grados de libertad de un sistema de materiales.
2. Describir la aplicación de las reglas de Gibbs en un sistema de materiales.
3. Describir las curvas de enfriamiento y los diagramas de fase y el tipo de información que puede obtenerse de ellos.
4. Describir un diagrama de fases binario isomorfo y trazar un diagrama genérico que muestre todas las regiones de las fases y la información relevante.
5. Aplicar la línea de enlace y la regla de palanca a los diagramas de fase, a fin de determinar la composición de las fases y la fracción de fase de una mezcla.
6. Describir la solidificación de metales fuera del equilibrio y explicar las diferencias generales en microestructura al compararla con la solidificación en equilibrio.
7. Describir el diagrama de fases binarias eutécticas y ser capaz de trazar un diagrama genérico que muestre todas las regiones de las fases y la información importante.
8. Describir la evolución de las microestructuras durante el enfriamiento en equilibrio a medida que el metal se solidifica en las diversas regiones del diagrama de fases.
9. Definir diversas reacciones invariantes.
10. Definir los compuestos de fase intermedia e intermetálicos de fase intermedia.
11. Describir los diagramas de fases ternarios.

8.1 DIAGRAMAS DE FASE DE SUSTANCIAS PURAS

Animación

Una sustancia pura como el agua puede existir en las fases sólida, líquida y vapor, según sean las condiciones de temperatura y presión. Un ejemplo muy conocido de dos fases de una sustancia pura en **equilibrio**, es un vaso de agua que contiene unos cubos de hielo. En este caso, el agua, sólida y líquida, da lugar a dos fases distintas separadas por una fase límite, la superficie de los cubos del hielo. Durante la ebullición del agua, el agua líquida y el agua vaporizada constituyen dos fases en equilibrio. En la figura 8.1 se muestra una representación gráfica de las fases del agua que existen bajo diferentes condiciones de presión y temperatura.

En el diagrama de *fases presión-temperatura (PT)* del agua existe un *punto triple* a baja presión (4.579 torr) y baja temperatura (0.0098°C) donde coexisten las fases sólida, líquida y vapor. Las fases líquida y vapor se dan a lo largo de la línea de vaporización y las fases líquida y sólida a lo largo de la línea de congelación, como se muestra en la figura 8.1. Estas líneas son de equilibrio entre dos fases.

Los diagramas de fase presión-temperatura en el equilibrio se pueden construir también para otras sustancias puras. Por ejemplo, el diagrama de fase de equilibrio *PT* del hierro puro se muestra en la figura 8.2. Una diferencia fundamental de ese diagrama de fase es que tiene tres *fases sólidas* distintas y separadas: alfa (α) Fe, gamma (γ) Fe, y delta (δ) Fe. El hierro alfa y el hierro delta tienen estructuras cristalinas BCC,

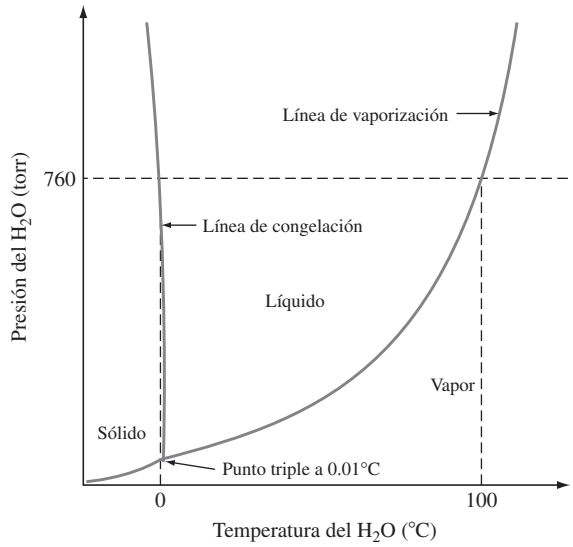
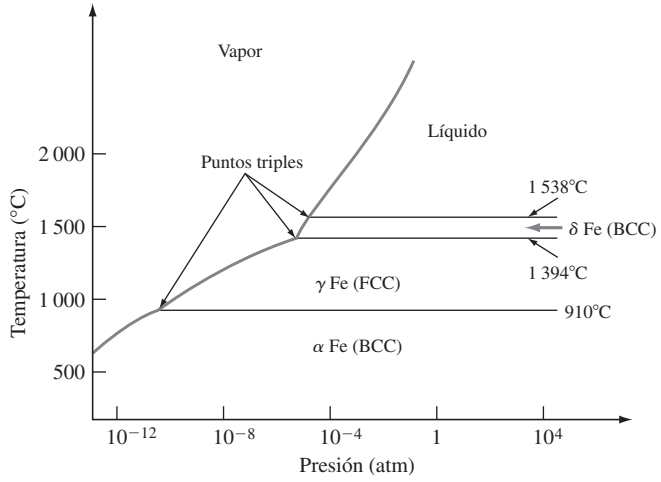


Figura 8.1
Diagrama de fases en equilibrio presión-temperatura *PT* aproximado, para el agua pura. (Los ejes del diagrama se encuentran algo distorsionados.)



Animación

Figura 8.2
Diagrama de fases en equilibrio presión-temperatura *PT* aproximado, para el hierro puro.
(Según W. G. Moffatt et al., "Structure and Properties of Materials", vol. I, Wiley, 1964, p. 151.)

mientras el hierro gamma tiene una estructura FCC. Los límites de fase en el estado sólido tienen las mismas propiedades que los límites de las fases líquida y sólida. Por ejemplo, bajo condiciones de equilibrio, el hierro alfa y gamma pueden existir a una temperatura de 910°C y 1 atmósfera de presión. Por encima de 910°C sólo existe la fase sencilla gamma, y por debajo de 910°C sólo existe la fase sencilla alfa (figura 8.2).

Hay también tres puntos triples en el diagrama *PT* del hierro donde coexisten las tres fases diferentes: 1) líquido, vapor y δFe, 2) vapor, δFe y γFe, y 3) vapor, γFe y αFe.

8.2 REGLA DE LAS FASES DE GIBBS

A partir de consideraciones termodinámicas, J. W. Gibbs[3] obtuvo una ecuación que permitía calcular el número de fases que pueden coexistir en equilibrio en cualquier sistema. Esta ecuación, llamada **regla de las fases de Gibbs**, es

$$P + F = C + 2 \qquad \textbf{(8.1)}$$

donde P = número de fases que pueden coexistir en el sistema
C = **número de componentes** en el sistema
F = grados de libertad

Usualmente, un componente C es un elemento, un compuesto o una solución en el sistema. F son los **grados de libertad**, es decir, el número de variables (presión, temperatura y composición) que se pueden cambiar independientemente sin variar el número de fases en equilibrio en el sistema elegido.

Considérese la aplicación de la regla de Gibbs al diagrama de fases presión-temperatura *PT* del agua pura (figura 8.1). En el punto triple coexisten tres fases en equilibrio y como hay un componente en el sistema (agua), se puede calcular el número de grados de libertad:

$$\begin{aligned} P + F &= C + 2 \\ 3 + F &= 1 + 2 \end{aligned} \qquad \textbf{(8.1)}$$

o

$$F = 0 \qquad \text{(cero grados de libertad)}$$

Como ninguna de las variables (presión o temperatura) se puede cambiar, manteniendo el equilibrio al punto triple se le llama *punto invariante*.

Considérese ahora un punto en la curva de congelación sólido-líquido de la figura 8.1. En cualquier punto de esa línea hay dos fases que coexisten. Así, aplicando la regla de las fases,

$$2 + F = 1 + 2$$

o

$$F = 1 \qquad \text{(un grado de libertad)}$$

Este resultado indica que hay un grado de libertad y, por tanto, una variable (T o P) puede cambiarse de forma independiente manteniendo un sistema con dos fases que coexisten. En consecuencia, si se especifica una presión determinada, sólo hay una temperatura en la que las fases sólida y líquida coexisten. Para un tercer caso, considérese un punto, dentro de una fase única, en el diagrama de fases *PT* del agua. En ese caso sólo habrá una fase presente ($P = 1$), y sustituyendo en la ecuación de la regla de las fases

$$1 + F = 1 + 2$$

---

[3] Josiah Willard Gibbs (1839-1903). Físico estadounidense. Fue profesor de matemáticas y física en la Universidad de Yale e hizo grandes contribuciones a la ciencia de la termodinámica, entre las que se incluyen la relación de la regla de las fases para sistemas multifase.

o

$$F = 2 \qquad \text{(dos grados de libertad)}$$

Este resultado indica que pueden cambiarse dos variables independientemente (presión y temperatura) y que el sistema permanecerá como una única fase.

Los diagramas de fase binarios utilizados en la ciencia de los materiales son, en su mayoría, diagramas temperatura-composición, en los que la presión se mantiene constante, por lo general a 1 atm. En este caso, se tiene la regla de fases condensada, dada por

$$P + F = C + 1 \qquad \textbf{(8.1}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

La ecuación 8.1*a* se aplicará a todos los diagramas de fases subsiguientes expuestos en este capítulo.

8.3 CURVAS DE ENFRIAMIENTO

Las curvas de enfriamiento pueden emplearse para determinar las temperaturas de transición de las fases tanto para metales puros como para aleaciones. Una **curva de enfriamiento** se obtiene al registrar la temperatura de un material y compararla con el tiempo a medida que se enfría desde una temperatura en la cual se funde, mediante solidificación y, finalmente, a temperatura ambiente. En la figura 8.3 se muestra la curva de enfriamiento para un metal puro. Si se permite que el metal se enfríe en condiciones de equilibrio (enfriamiento lento), su temperatura cae continuamente a lo largo de la línea *AB* de la curva. En el punto de fusión (temperatura de congelación) comienza la solidificación y la curva de enfriamiento se vuelve plana (segmento horizontal *BC*, también llamada **meseta** o **región de confinamiento térmico**) y permanece plana hasta que se completa la solidificación. En la región *BC*, el metal está en forma de mezcla de fases sólidas y líquidas. A medida que se acerca al punto *C*, la fracción de peso del sólido de la mezcla aumenta hasta que termina la solidificación. La temperatura permanece constante porque hay un equilibrio entre la pérdida de calor del metal por el molde y el calor latente suministrado por el metal que se solidifica. En palabras llanas, el calor latente mantiene a la mezcla a la temperatura de congelación hasta que se alcanza la solidificación completa. Después de concluir la solidificación en *C*, la curva de enfriamiento mostrará de nuevo una disminución de la temperatura con el tiempo (segmento *CD* de la curva).

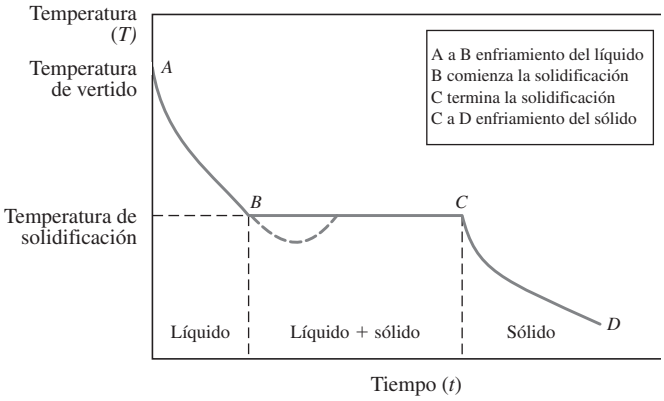


Figura 8.3
Curva de enfriamiento para un metal puro.

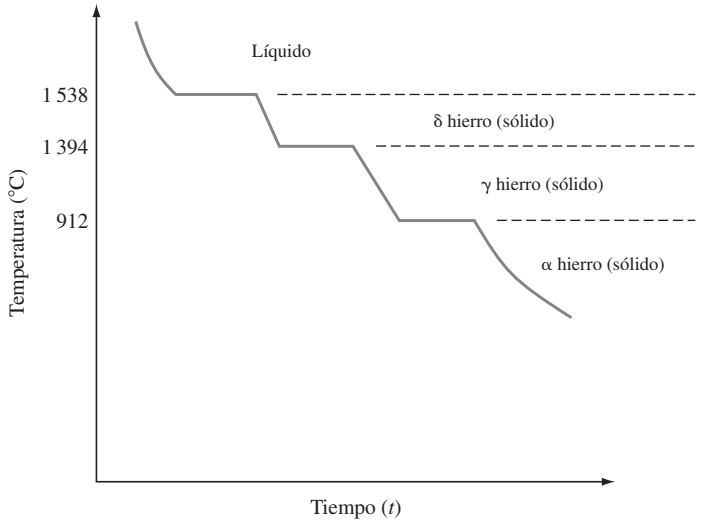


Figura 8.4
Curva de enfriamiento para hierro puro a una presión de 1 atm.

Como se expuso en la sección sobre la solidificación de los metales puros en el capítulo 4, es necesario algún grado de subenfriamiento (enfriamiento por debajo de la temperatura de congelación) para la formación de núcleos sólidos. El subenfriamiento aparecerá en la curva de enfriamiento como una disminución por debajo de la temperatura de congelación, como se muestra en la figura 8.3.

La curva de enfriamiento también puede proporcionar información relativa a la transformación de las fases de estado sólido en los metales. Un ejemplo de esa curva de enfriamiento es el del hierro puro. La curva de enfriamiento del hierro puro en condiciones de presión atmosférica ($P = 1$ atm) muestra una temperatura de congelación de 1 538°C, punto en el cual se forma un sólido de estructura BCC a alta temperatura denominado *hierro* δ (figura 8.4). Con enfriamiento adicional, a una temperatura de 1 394°C, aproximadamente, la curva de enfriamiento muestra una segunda meseta. A esta temperatura ocurre una transformación de fase sólida-sólida de BCC δ ferrita a un sólido FCC llamado *hierro* γ (transformación polimórfica, véase la sección 3.10). Con más enfriamiento, tiene lugar una segunda transformación de fase sólida-sólida a una temperatura de 912°C. En esta transformación el hierro FCC γ vuelve a tomar una estructura de hierro BCC llamado *hierro* α. Esta transformación de fase sólida-sólida tiene importantes implicaciones tecnológicas en industrias de elaboración del acero y se expondrá en el capítulo 9.

8.4 SISTEMAS DE ALEACIONES BINARIAS ISOMÓRFICAS

Considérese ahora una mezcla o aleación de dos metales en lugar de sustancias puras. Una mezcla de dos metales se denomina *aleación binaria* y constituye un sistema *bicomponente* dado que cada elemento metálico de una aleación se considera como un componente separado. Así, el cobre puro es un sistema monocomponente, mientras que una aleación de cobre y níquel es un sistema bicomponente. En ocasiones, los aceros al carbono que contienen principalmente hierro y carburo de hierro se consideran sistemas bicomponentes.

En algunos sistemas binarios metálicos los dos elementos son completamente solubles entre sí tanto en sus estados líquidos como sólidos. En estos sistemas, sólo existe un tipo de estructura cristalina para todas las composiciones de los componentes, por tanto, se denominan **sistemas isomórficos**. A fin de que los dos elementos tengan solubilidad sólida completa entre sí, suelen satisfacer una o más de las siguientes condiciones formuladas por Hume-Rothery[4] y conocidas como las reglas de solubilidad sólida de Hume-Rothery.

1. El tamaño de los átomos de cada uno de los dos elementos no debe diferir en más de 15 por ciento.

2. Los elementos no deben formar compuestos entre sí, esto es, no debe haber una diferencia apreciable en las electronegatividades de los dos elementos.

3. La estructura cristalina de cada elemento de la solución sólida debe ser la misma.

4. Los elementos deben tener la misma valencia.

Las reglas de Hume-Rothery no son todas aplicables a cada par de elementos que muestra solubilidad sólida completa.

Un ejemplo importante de un sistema de aleación binaria isomórfica es el sistema de cobre-níquel. En la figura 8.5 se muestra un diagrama de fases de este sistema con la temperatura como ordenada y la composición química en porcentaje de peso como abscisa. Este diagrama se ha determinado para condiciones de enfriamiento o equilibrio lentos a presión atmosférica, y no se aplica a aleaciones que se hayan enfriado rápidamente a lo largo del rango de solidificación. El área por encima de la línea superior del diagrama, llamado **liquidus**, corresponde a la región de estabilidad de la fase líquida y el área por debajo de la línea inferior, o **solidus**, representa la región de estabilidad de la fase sólida. La región entre el liquidus y el solidus representa una región bifásica donde coexisten la fase líquida y sólida.

Para el diagrama de fases binario isomórfico de Cu y Ni, de acuerdo con la regla de Gibbs ($F = C - P + 1$), a la temperatura de fusión de los componentes puros, el número de componentes C es 1 (ya sea Cu o Ni) y el número de fases disponible P es 2 (líquida o sólida), lo cual da por resultado un grado de libertad de 0 ($F = 1 - 2 + 1 = 0$). Estos puntos se denominan *puntos invariantes* ($F = 0$). Esto significa que cualquier cambio de temperatura modificará la microestructura, ya sea a sólida o líquida. Por consiguiente, en las regiones monofásicas (líquida o sólida), el número de componentes, C, es de 2, y el número de fases disponibles, P, es 1, lo que da por resultado un grado de libertad de 2 ($F = 2 - 1 + 1 = 2$). Esto significa que se puede mantener la microestructura del sistema en esta región mediante la variación ya sea de la temperatura o de la composición de manera independiente. En la región bifásica, el número de componentes, C, es de 2, y el número de fases disponibles, P, es de 2, lo que da por resultado un grado de libertad de 1 ($F = 2 - 2 + 1 = 1$). Esto significa que sólo una variable (ya sea temperatura o composición) puede modificarse independientemente del tiempo que se mantiene la estructura bifásica del sistema. Si se modifica la temperatura, la composición de las fases también cambiará.

En la región monofásica de la solución sólida α, tanto la temperatura como la composición de la aleación deben especificarse a fin de localizar un punto en el diagrama de

[4] William Hume-Rothery (1899-1968). Metalúrgico inglés que hizo importantes contribuciones a la metalurgia teórica y experimental y que dedicó años al estudio del comportamiento de las aleaciones. Sus reglas empíricas de solubilidad sólida en las aleaciones se basaron en su trabajo de diseño de aleaciones.

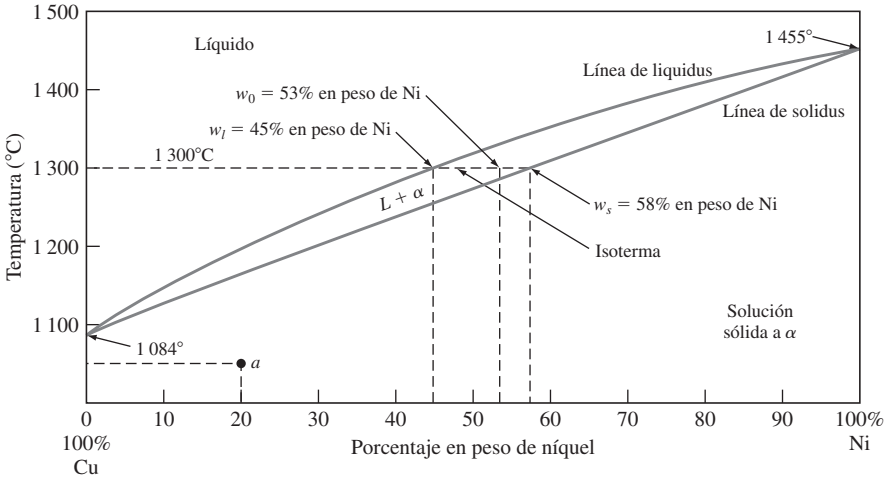


Figura 8.5
Diagrama de fases del cobre-níquel. El cobre y el níquel tienen una solubilidad líquida y sólida completa. Las soluciones sólidas de cobre y níquel se funden en un rango de temperaturas más que a una temperatura fija, como es el caso de los metales puros.
(Según "Metals Handbook", vol. 8, 8a. ed., American Society for Metals, 1973, p. 294.)

IceNine

fases. Por ejemplo, la temperatura de 1 050°C y 20 por ciento de Ni, especifican el punto *a* en el diagrama de fases Cu-Ni de la figura 8.5. La microestructura de la solución sólida α a esta temperatura y composición parece como la misma que la de un metal puro; esto es, la única característica observable en el microscopio óptico serán los límites de grano. Sin embargo, dado que la aleación es una solución sólida de 20 por ciento de Ni en cobre, la aleación tendrá mayor dureza y resistividad eléctrica que el cobre puro.

En la región entre las líneas liquidus y solidus, existen tanto fases líquidas como sólidas. La cantidad de cada fase presente depende de la temperatura y de la composición química de la aleación. Considérese una aleación de 53 por ciento en peso de Ni-47 por ciento en peso de Cu a 1 300°C en la figura 8.5. Dado que esta aleación contiene tanto fases líquidas como sólidas a 1 300°C, ninguna de estas fases puede tener la composición media de 53 por ciento en peso de Ni-47 por ciento en peso de Cu. Las composiciones de las fases líquidas y sólidas a 1 300°C pueden determinarse trazando una *línea de enlace* horizontal a 1 300°C desde la línea de liquidus hasta la línea de solidus, y luego trazando líneas verticales hacia el eje horizontal de la composición. La composición de la fase líquida (w_l) a 1 300°C contiene 45 por ciento en peso de Ni y la de la fase sólida (w_s) es 58 por ciento en peso de Ni, como lo indica la intersección de las líneas verticales punteadas con el eje de la composición.

Los diagramas de fases binarios de equilibrio para los componentes que son completamente solubles entre sí en el estado sólido, pueden construirse a partir de una serie de curvas de enfriamiento de líquido-sólido, como lo muestra el sistema Cu-Ni de la figura 8.6. Las curvas de enfriamiento para los metales puros muestran confinamientos térmicos horizontales en sus puntos de congelación, como se muestra para el cobre y el níquel puros en la figura 8.6*a* en *AB* y *CD*. Las soluciones sólidas binarias muestran cambios de pendiente en sus curvas de enfriamiento en las líneas liquidus y solidus, como se muestra en la figura 8.6*a* a composiciones de 80% Cu-20% Ni, 50%

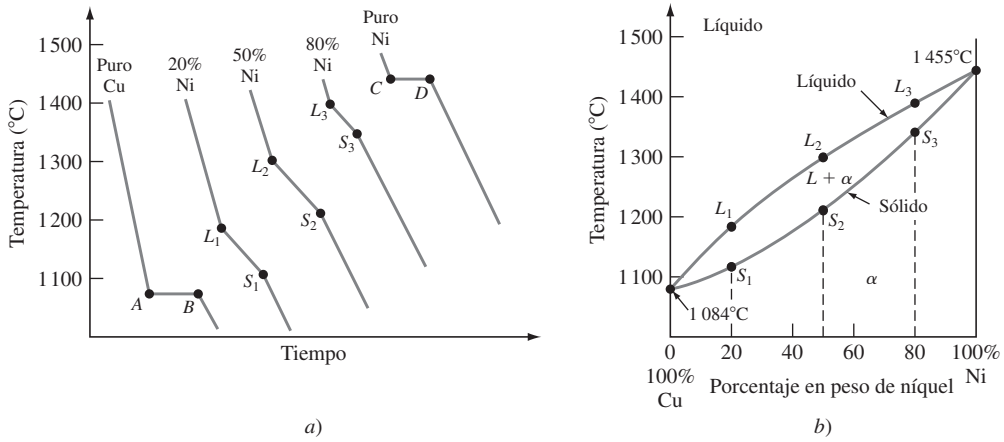


Figura 8.6
Construcción del diagrama de fases en equilibrio del Cu-Ni a partir de las curvas de enfriamiento líquido-sólido. *a*) Curvas de enfriamiento y *b*) diagrama de fases en equilibrio.

Cu-50% Ni, y 20% Cu-80% Ni. Los cambios de pendiente en L_1, L_2 y L_3 de la figura 8.6*a* corresponden a los puntos liquidus L_1, L_2 y L_3 de la figura 8.6*b*. De manera similar, los cambios de pendiente de S_1, S_2 y S_3 de la figura 8.6*a* corresponden a los puntos de la línea solidus de la S_1, S_2 y S_3 de la figura 8.6*b*. Puede lograrse más exactitud en la construcción del diagrama de fases Cu-Ni mediante la determinación de más curvas de enfriamiento en composiciones de aleaciones intermedias.

La curva de enfriamiento para aleaciones metálicas no contiene la región de confinamiento térmico que se observa en la solidificación de un metal puro. En lugar de ello, la solidificación comienza a una temperatura específica y termina a una temperatura menor representada por los símbolos *L* y *S* en la figura 8.6. Como resultado de ello, a diferencia de los metales puros, las aleaciones se solidifican a lo largo de un intervalo de temperaturas. Por tanto, cuando se hace referencia a la temperatura de congelación de una aleación metálica, se habla de la temperatura a la cual concluye el proceso de solidificación.

8.5 REGLA DE LA PALANCA

Los porcentajes en peso de las fases en cualquiera de las regiones de doble fase de un diagrama de fases en equilibrio binario, se pueden calcular usando la **regla de la palanca**. Por ejemplo, el porcentaje en peso del líquido y el porcentaje del sólido para una determinada temperatura, se pueden calcular para cualquier aleación de composición media en la región de dos fases líquida y sólida en el diagrama de fase de cobre-níquel de la figura 8.5.

Para obtener las ecuaciones de la regla de la palanca se considera un diagrama de fases binario en equilibrio de dos elementos A y B, que son completamente solubles el uno en el otro, como se muestra en la figura 8.7. Sea x la composición de la aleación y w_0 la fracción en peso de B en A. Sea T la temperatura y constrúyase la línea **de enlace** a esa temperatura T desde la línea de liquidus en el punto L hasta la del sólido en el punto S (*LS*), formando la línea de enlace *LOS*. A la temperatura T, la aleación x consta de una mezcla de líquido de fracción en peso w_l de B y de sólido de fracción en peso w_s de B.

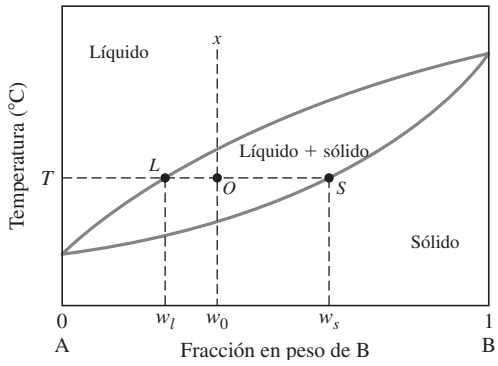


Figura 8.7
Diagrama de fases binario de dos metales A y B completamente solubles el uno en el otro, usado para la deducción de las ecuaciones de la regla de la palanca. A una temperatura *T*, la composición de la fase líquida es w_l y la de la fase sólida w_s.

Las ecuaciones de la regla de la palanca se obtienen usando los balances de peso. Al sumar la fracción de peso de la fase líquida, X_l, y la fracción de peso la fase sólida, X_s, las cuales deben ser igual a 1, resulta una ecuación para deducir dichas ecuaciones. De este modo,

$$X_l + X_s = 1 \qquad \textbf{(8.2)}$$

o

$$X_l = 1 - X_s \qquad \textbf{(8.2}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

y

$$X_s = 1 - X_l \qquad \textbf{(8.2}\boldsymbol{b}\textbf{)}$$

Una segunda ecuación para la deducción de la regla de la palanca se obtiene por balance de peso de B en la aleación como un todo y la suma de B en las dos fases por separado. Considérese 1 g de la aleación y efectúese el balance de peso:

Gramos de B en la mezcla de dos fases	=	Gramos de B en la fase líquida	+	Gramos de B en la fase sólida
Gramos de la mezcla de dos fases		Gramos de la fase líquida		Gramos de sólido

$$\overbrace{(1\text{ g})(1)}\left(\frac{\%w_0}{100}\right) = \overbrace{(1\text{ g})(X_l)}\left(\frac{\%w_l}{100}\right) + \overbrace{(1\text{ g})(X_s)}\left(\frac{\%w_s}{100}\right)$$

Fracción en peso de la mezcla de fases — Fracción en peso de la fase líquida — Fracción en peso de la fase sólida

Fracción en peso promedio de B en la mezcla de fases — Fracción en peso de B en la fase líquida — Fracción en peso de B en la fase sólida

(8.3)

De este modo, $$w_0 = X_l w_l + X_s w_s \quad \textbf{(8.4)}$$

combinado con $$X_l = 1 - X_s \quad \textbf{(8.2}a\textbf{)}$$

da $$w_0 = (1 - X_s)w_l + X_s w_s$$

o $$w_0 = w_l - X_s w_l + X_s w_s$$

Reordenando, $$X_s w_s - X_s w_l = w_0 - w_l$$

$$\boxed{\text{Fracción en peso de la fase sólida} = X_s = \frac{w_0 - w_l}{w_s - w_l}} \quad \textbf{(8.5)}$$

Del mismo modo, $$w_0 = X_l w_l + X_s w_s \quad \textbf{(8.4)}$$

combinado con $$X_s = 1 - X_l \quad \textbf{(8.2}b\textbf{)}$$

da $$\boxed{\text{Fracción en peso de la fase líquida} = X_l = \frac{w_s - w_0}{w_s - w_l}} \quad \textbf{(8.6)}$$

Las ecuaciones 8.5 y 8.6 son las ecuaciones de la regla de la palanca. Efectivamente, estas ecuaciones establecen que para calcular la fracción en peso de una fase de una mezcla de dos fases, se debe usar el segmento de línea de enlace que está en el lado opuesto de la aleación de interés y que está un poco más allá de la fase de la cual se quiere calcular la fracción. La relación entre este segmento de la línea de enlace y el total de la línea, proporciona la fracción en peso de la fase deseada. De este modo, en la figura 8.7 la fracción en peso de la fase líquida es la relación *OS/LS* y la de la fase sólida es *LO/LS*.

Las fracciones en peso se convierten en porcentajes en peso multiplicado por 100. El problema de ejemplo 8.1 muestra cómo puede ser utilizada la regla de la palanca para determinar el porcentaje en peso de una fase en una aleación binaria a una determinada temperatura.

PROBLEMA DE EJEMPLO 8.1

Deduzca la regla de la palanca para el caso indicado en la figura EP8.1.

■ Solución

Para deducir la regla de la palanca, se considerará el diagrama en equilibrio binario de dos elementos A y B, que son completamente solubles entre sí, como se muestra en la figura EP8.1. Sea x la composición de interés de la aleación y sea w_0 la fracción en peso de B en A. Sea T la temperatura de interés y trácese una línea de enlace la línea de solidus en el plano S para formar la línea de enlace *SOL*. De las soluciones de las ecuaciones de la regla de la palanca, se tiene:

La fracción en peso de la fase líquida sería igual:

$$\frac{w_0 - w_s}{w_l - w_s} = \frac{SO}{LS}$$

La fracción en peso de la fase sólida sería igual:

$$\frac{w_l - w_0}{w_l - w_s} = \frac{OL}{LS}$$

Este problema se ilustra a 1 200°C en el problema de ejemplo 8.3.

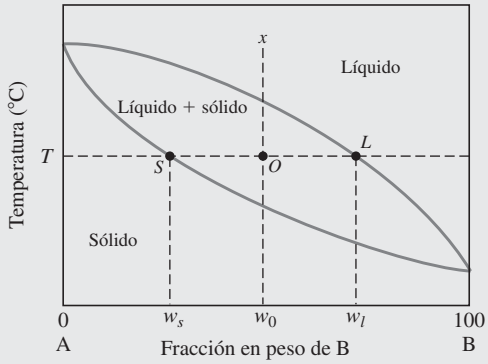


Figura EP8.1

PROBLEMA DE EJEMPLO 8.2

Una aleación de cobre-níquel contiene 47% en peso de Cu y 53% en peso de Ni y está a 1 300°C. Utilizando la figura 8.5 responda las cuestiones siguientes:

a) ¿Cuál es el porcentaje en peso de cobre en las fases sólida y líquida a esta temperatura?

b) ¿Qué porcentaje en peso de la aleación es líquida y qué porcentaje es sólida?

■ Solución

a) De la figura 8.5 a 1 300°C, la intersección de la línea de enlace con el liquidus da 55% en peso de Cu en la fase líquida y su intersección con el solidus ofrece 42% en peso de la fase sólida.

b) De la figura 8.5 y utilizando la regla de la palanca a 1 300°C sobre la línea de enlace,

$$w_0 = 53\%\ \text{Ni} \qquad w_l = 45\%\ \text{Ni} \qquad w_s = 58\%\ \text{Ni}$$

$$\text{Fracción en peso de la fase líquida} = X_l = \frac{w_s - w_0}{w_s - w_l}$$

$$= \frac{58 - 53}{58 - 45} = \frac{5}{13} = 0.38$$

$$\%\ \text{en peso de la fase líquida} = (0.38)(100\%) = 38\%\ \blacktriangleleft$$

$$\text{Fracción en peso de la fase sólida} = X_s = \frac{w_0 - w_l}{w_s - w_l}$$

$$= \frac{53 - 45}{58 - 45} = \frac{8}{13} = 0.62$$

$$\text{Porcentaje en peso de la fase sólida} = (0.62)(100\%) = 62\%\ \blacktriangleleft$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 8.3

Calcule el porcentaje de líquido y el porcentaje de sólido para el diagrama Ag-Pd que se muestra en la figura EP8.3 a 1 200°C y 70% en peso Ag. Considere $W_l = 74$ por Ag y $W_s = 64$ sen Ag.

■ **Solución**

$$W(\%)\ \text{líquido} = \frac{70 - 64}{74 - 64} = \frac{6}{10} = 60\%$$

$$W(\%)\ \text{sólido} = \frac{74 - 70}{74 - 64} = \frac{4}{10} = 40\%$$

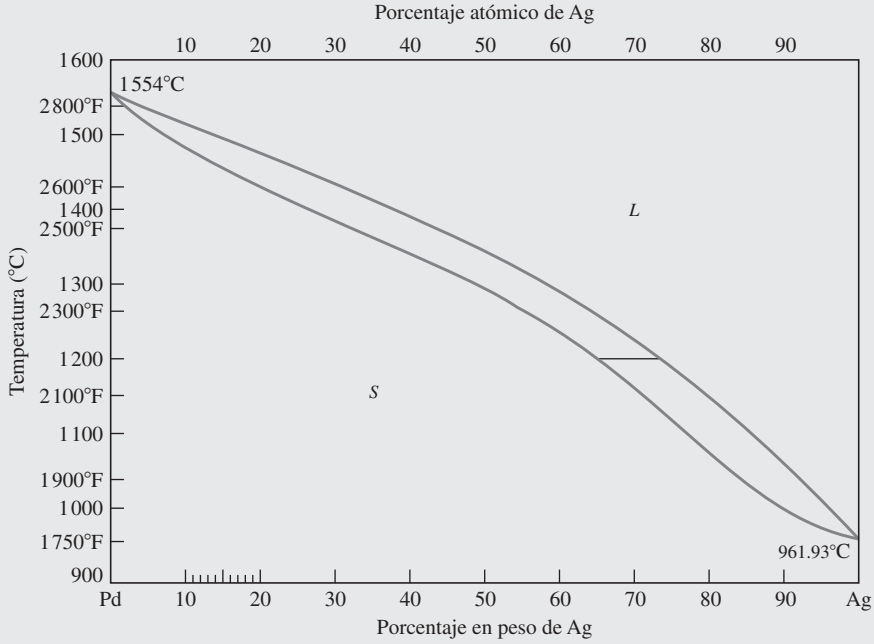


Figura EP8.3
El diagrama de fases Ag-Pd en el equilibrio.

IceNine

8.6 SOLIDIFICACIÓN FUERA DEL EQUILIBRIO DE LAS ALEACIONES

El diagrama de fases para el sistema Cu-Ni al que se ha hecho referencia antes, se construyó utilizando unas condiciones muy lentas de enfriamiento, aproximándose al equilibrio. Esto es, cuando las aleaciones Cu-Ni se enfrían a través de las regiones de dos fases líquida + sólida, las composiciones de las fases líquida y sólida sufren un reajuste continuo por la difusión en el estado sólido y a medida que la temperatura desciende. Puesto que la difusión atómica es muy lenta en el estado sólido, se requiere de un largo periodo para eliminar los gradientes de concentración. De este modo, las microestructuras de piezas recién fundidas procedentes de aleaciones solidificadas lentamente tienen en general una **estructura con gradiente de concentraciones** (figura 8.8) originada por regiones de diferente composición química.

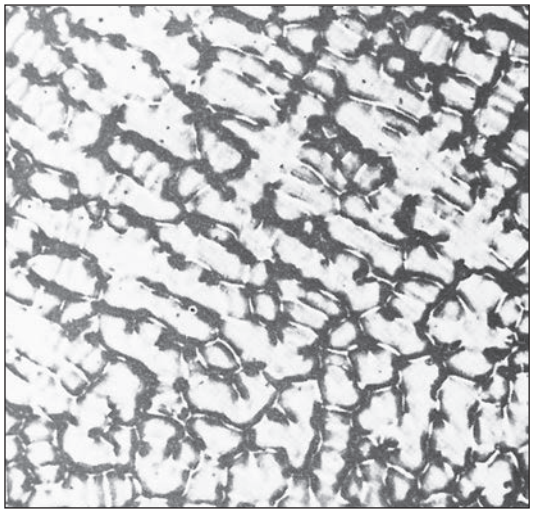


Figura 8.8
Microestructura de una pieza recién fundida por 70% Cu-30% Ni mostrando su estructura con gradiente de concentraciones.
(Según W. G. Moffatt et al., "Structure and Properties of Materials", vol. I, Wiley, 1964, p. 177.)

El sistema de aleación de cobre-níquel proporciona un buen ejemplo que describe cómo se origina una estructura con gradiente de concentraciones. Considérese una aleación de 70% Ni-30% Cu que se solidifica a partir de una temperatura T_0 de forma rápida (figura 8.9). El primer sólido se forma a una temperatura T_1 y tiene una composición α_1 (figura 8.9). Más allá del enfriamiento rápido que lleva a T_2, se formarán capas adicionales de composición α_2 sin muchos cambios en la composición del primer sólido solidificado. La composición global a la temperatura T_2 estará comprendida entre α_1 y α_2 y se designará como α'_2. Puesto que la línea $\alpha'_2 L_2$ es más larga que la $\alpha_2 L_2$, habrá más líquido y menos sólido en la aleación solidificada rápidamente que si hubiera sido solidificada bajo condiciones de equilibrio hasta alcanzar la misma temperatura. De este modo, la solidificación se ha demorado a esa temperatura por el enfriamiento rápido.

A medida que se disminuye la temperatura de T_3 a T_4, tiene lugar el mismo proceso y la composición global de la aleación sigue la curva de *solidus de no equilibrio* $\alpha_1 \alpha'_2 \alpha'_3 \cdots$. A T_6 el material solidificado tiene menos cobre que la composición original de la aleación que es de 30 por ciento de Cu. A la temperatura T_7 la composición global de la aleación es de 30 por ciento de Cu y finaliza la solidificación. Las regiones dentro de la microestructura de aleación constarán, por consiguiente, de composiciones que varían desde α_1 a α'_7 a medida que se forma la estructura con gradiente de concentraciones durante la solidificación (figura 8.10). En la figura 8.8 se muestra una microestructura con gradiente de concentraciones solidificada rápidamente de la aleación 70% de Cu-30% de Ni.

Las microestructuras recién fundidas tienen, en su mayoría, estructuras con gradiente de concentraciones en algún grado, y, por tanto, tienen gradientes de composición. En muchos casos, esta estructura no es deseable, particularmente si la aleación va a ser trabajada posteriormente. Para eliminar la estructura con gradiente de concentraciones, los lingotes o piezas fundidas se calientan a temperaturas elevadas para acele-

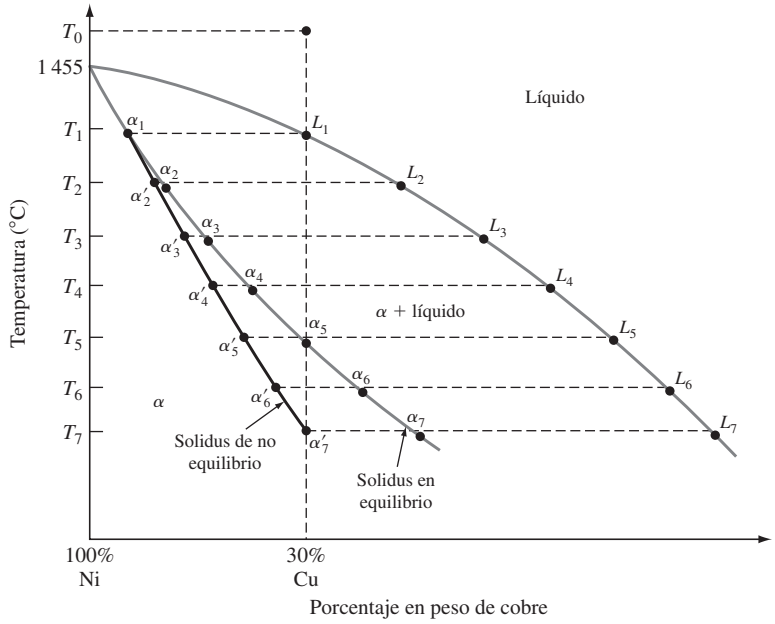


Figura 8.9
Solidificación fuera del equilibrio de una aleación 70%-Ni30% Cu. Este diagrama de fases ha sido distorsionado para el propósito de ilustración. Obsérvese la línea de solidus de no equilibrio α_1 a α'_7. La aleación no se solidificó completamente hasta alcanzar el solidus de no equilibrio de α'_7 a T_7.

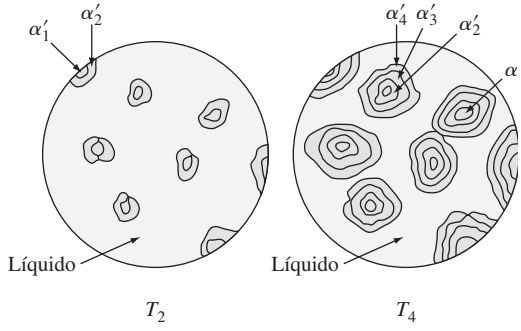


Figura 8.10
Microestructura esquematizada a temperaturas T_2 y T_4 de la figura 8.9 para la solidificación fuera del equilibrio de una aleación 70%-Ni30% Cu, ilustrando el desarrollo de una estructura segregada.

rar la difusión en el estado sólido. Este proceso se llama **homogeneización**, ya que produce una estructura homogénea en la aleación. En la figura 8.11 se muestran lingotes de aleación de aluminio que van a ser cargados a un horno homogeneizador. El tratamiento térmico de homogeneización se debe realizar a una temperatura menor que la del sólido que funda más bajo en la aleación fundida o, de otra forma, la aleación se fundiría. Para homogeneizar la aleación 70% Ni-30% Cu anterior, se debería emplear

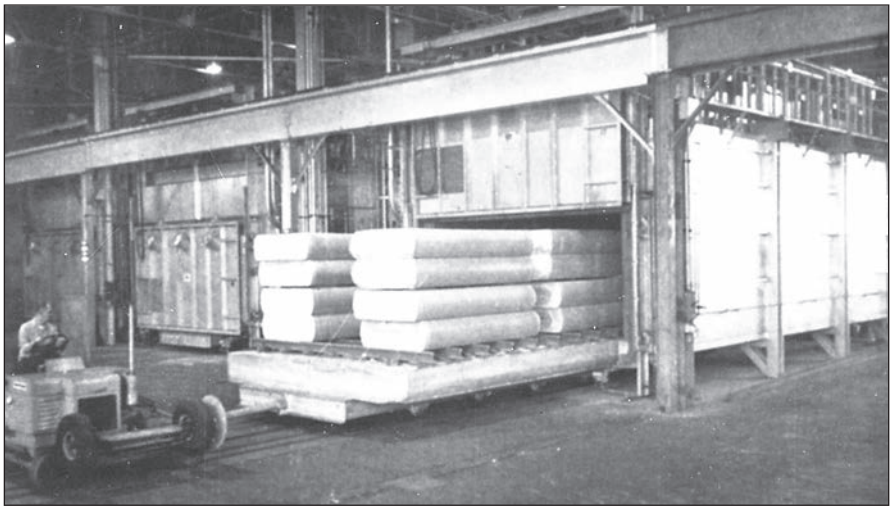


Figura 8.11
Grandes lingotes de aleación de aluminio de fundición en enfriamiento directo se cargan dentro de un horno de homogeneización. Cuando los lingotes recién fundidos se vuelven a calentar a una temperatura por debajo de la temperatura de fusión de la fase que funde primero, la difusión atómica en el estado sólido crea una estructura interna más homogénea.
(Por cortesía de Reynolds Metals Co.)

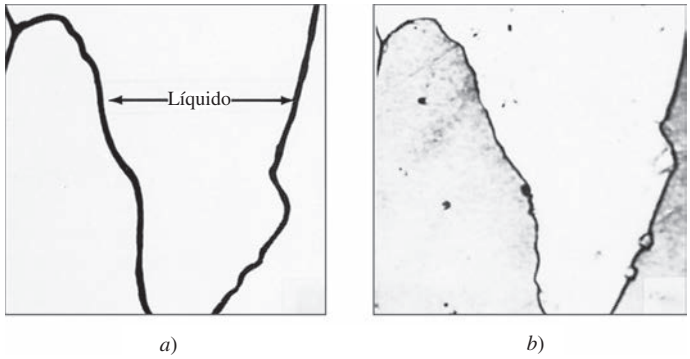


Figura 8.12
Fusión localizada en una aleación de 70% Ni-30% Cu. Calentando ligeramente por encima de la temperatura del sólido, justo para que comience la fusión, se produce una estructura con fusión localizada como la que se muestra en *a*). En *b*) la región del límite del grano fue fundida ligeramente y entonces, mediante un enfriamiento subsiguiente, la zona fundida se hizo cada vez más rica en cobre y dio lugar a que los límites de grano aparezcan como líneas gruesas oscuras.
(Cortesía de F. Rhines.)

una temperatura justo debajo de T_7 e indicada en la figura 8.9. Si la aleación es sobrecalentada, puede presentar fusión localizada o *licuación*. Si la fase líquida forma una película continua a lo largo de los límites de los granos, la aleación perdería la resistencia y podría romperse durante los trabajos posteriores. En la figura 8.12 se muestra la fusión localizada en la microestructura de la aleación 70% Ni-30% Cu.

8.7 SISTEMAS DE ALEACIONES BINARIAS EUTÉCTICAS

Muchos sistemas de aleaciones binarias tienen componentes que presentan solubilidad sólida limitada de un elemento en otros como, por ejemplo, en el sistema Pb-Sn (figura 8.13). Las regiones de solubilidad sólida restringida en cada extremo del diagrama Pb-Sn se designan como fases alfa y beta, y se denominan *soluciones sólidas terminales*, ya que aparecen al final del diagrama. La fase alfa es una solución sólida rica en plomo y puede disolver en solución sólida un máximo de 19.2% en peso de Sn a 183°C. La fase beta es una solución sólida rica en estaño y puede disolver un máximo de 2.5% en peso de Pb a 183°C. A medida que la temperatura disminuye por debajo de 183°C, la solubilidad sólida máxima de los elementos solutos disminuye siguiendo las líneas de **solvus** del diagrama de fases Pb-Sn.

En los sistemas binarios eutécticos simples como Pb-Sn, hay una aleación compuesta conocida como **composición eutéctica**, la cual solidifica a temperatura más baja que todas las demás composiciones. Esta baja temperatura, que corresponde a la mínima temperatura a la cual la fase líquida puede existir cuando se enfría lentamente, es

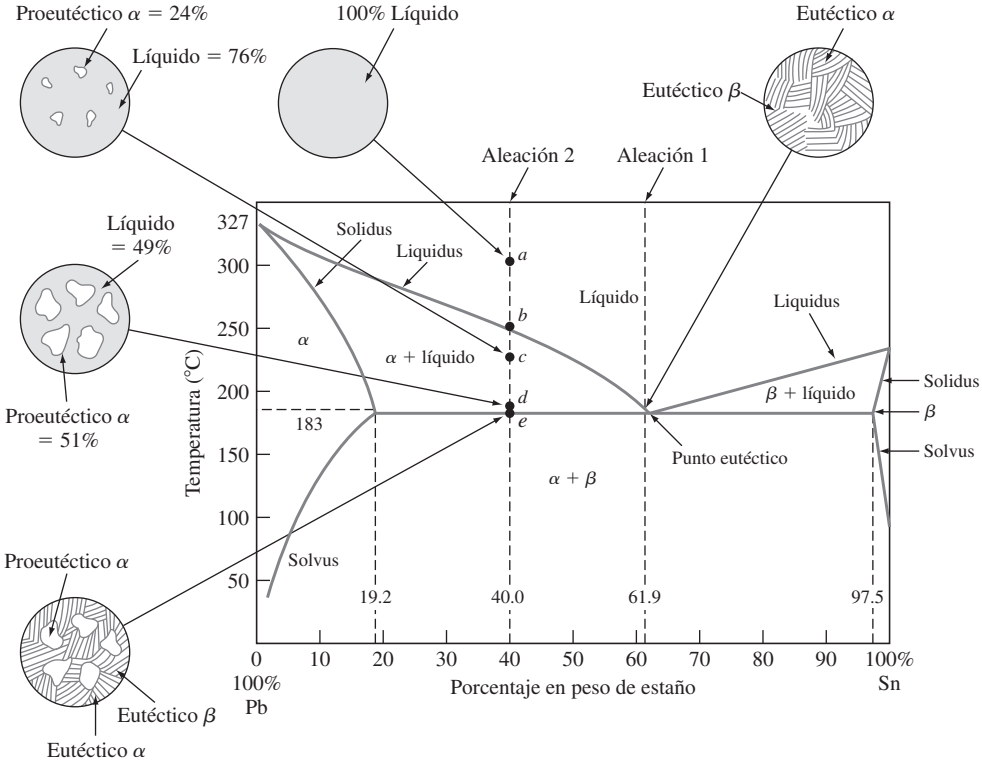


Figura 8.13
Diagrama de fases en equilibrio Pb-Sn. Este diagrama está caracterizado por la solubilidad sólida limitada en cada fase terminal (α y β). La reacción invariante eutéctica con 61.9% de Sn y 183°C es la característica más importante de todo el sistema. En el punto eutéctico pueden coexistir α (19.2% Sn), β (97.5% Sn) y líquido (61.9% Sn).

IceNine

la llamada **temperatura eutéctica**. En el sistema Pb-Sn la composición eutéctica (61.9 por ciento Sn y 38.1 por ciento Pb) y la temperatura eutéctica (183°C) determinan un punto en el diagrama de fases llamado **punto eutéctico**. Cuando el líquido de la composición eutéctica se enfría lentamente hasta la temperatura eutéctica, la fase simple líquida se transforma simultáneamente en dos formas sólidas (soluciones sólidas α y β). Esta transformación se conoce como **reacción eutéctica** y se escribe como

$$\text{Líquido} \xrightarrow[\text{enfriamiento}]{\text{temperatura eutéctica}} \text{solución sólida } \alpha + \text{solución sólida } \beta \qquad \textbf{(8.7)}$$

La reacción eutéctica se llama **reacción invariante** porque tiene lugar bajo condiciones de equilibrio a temperatura específica y a composición de la aleación invariable (de acuerdo con la regla de Gibbs, $F = 0$). Durante el progreso de la reacción eutéctica, la fase líquida está en equilibrio con las dos soluciones sólidas α y β, de modo que durante una reacción eutéctica coexisten tres fases y están en equilibrio. Puesto que tres fases en un diagrama de fase binario sólo pueden estar en equilibrio a una temperatura, una estabilización térmica horizontal aparece a temperatura eutéctica en la curva de enfriamiento de una aleación de composición eutéctica.

Enfriamiento lento de una aleación Pb-Sn de composición eutéctica. Considérese el enfriamiento lento de una aleación Pb-Sn (aleación 1 de la figura 8.13) de composición eutéctica (61.9 por ciento Sn) desde 200°C hasta temperatura ambiente. Durante el periodo de enfriamiento de 200 a 183°C, la aleación permanece líquida. A 183°C, que es la temperatura eutéctica, todo el líquido se solidifica por la reacción eutéctica y forma una mezcla eutéctica de soluciones sólidas α (19.2 por ciento Sn) y β (97.5 por ciento Sn) de acuerdo a la reacción

$$\text{Líquido } (61.9\%\ \text{Sn}) \xrightarrow[\text{enfriamiento}]{183^\circ\text{C}} \alpha\ (19.2\%\ \text{Sn}) + \beta\ (97.5\%\ \text{Sn}) \qquad \textbf{(8.8)}$$

Una vez concluida la reacción eutéctica, al enfriar la aleación desde los 183°C hasta temperatura ambiente, hay una disminución en la solubilidad sólida del soluto en las soluciones sólidas α y β, como queda indicado por las líneas de solidus. Sin embargo, ya que la difusión es lenta a temperaturas más bajas, este proceso no llega a alcanzar el equilibrio normalmente y, de este modo, las soluciones sólidas α y β pueden aún distinguirse a temperatura ambiente, como se muestra en la microestructura de la figura 8.14*a*.

Las composiciones a la izquierda del punto eutéctico se llaman **hipoeutécticas** (figura 8.14*b*). A la inversa, las composiciones a la derecha del punto eutéctico se llaman **hipereutécticas** (figura 8.14*d*).

Enfriamiento lento de una aleación 60% de Pb-40% Sn. A continuación se considerará el enfriamiento lento de una aleación 40% Sn-60% Pb (aleación 2 de la figura 8.13) desde el estado líquido a 300°C hasta la temperatura ambiente. A medida que la temperatura baja de 300°C (punto *a*), la aleación permanecerá líquida hasta que la línea de liquidus es intersectada en el punto *b* a una temperatura aproximada de 245°C. A esta temperatura la solución sólida α conteniendo 12 por ciento de Sn, comenzará a precipitar desde el líquido. El primer sólido que se forma en este tipo de aleación se llama **primario** o **alfa**

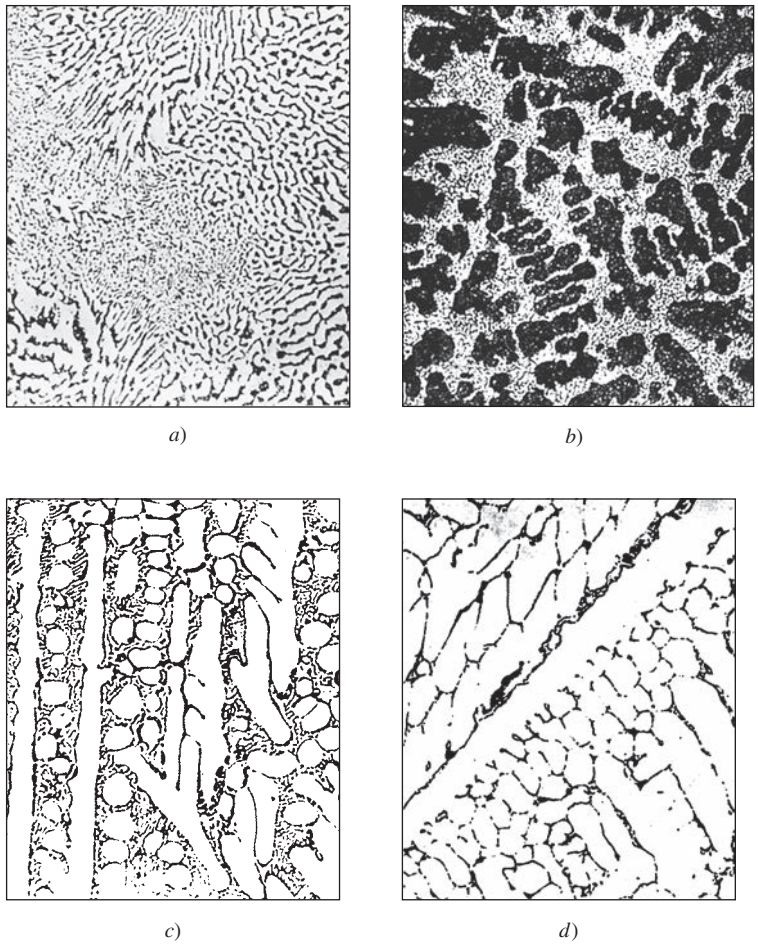


Figura 8.14
Microestructuras de enfriamiento lento de aleaciones Pb-Sn: *a*) composición eutéctica (63% Sn-37% Pb), *b*) 40% Sn-60% Pb, *c*) 70% Sn-30% Pb, *d*) 90% Sn-10% Pb. (Ampliación 75×.)
(Tomada de J. Nutting y R. G. Baker, "Microestructure of Metals", Institute of Metals, Londres, 1965, p. 19.)

proeutéctico. El término alfa proeutéctico se usa para distinguir este constituyente del sólido alfa que se forma después por la reacción eutéctica.

A medida que el líquido se enfría desde 245°C a una temperatura ligeramente por encima de 183°C a través de la región binaria líquida + región alfa en el diagrama de fases (puntos *b* a *d*), la composición de la fase sólida (alfa) sigue la línea de solidus y varía desde 12 por ciento de Sn a 245°C hasta 19.2 por ciento de Sn a 183°C. Del mismo modo, la composición de la fase líquida varía desde 40 por ciento en Sn a 245°C hasta 61.9 por ciento Sn a 183°C. Estos cambios de composición son posibles ya que la aleación se enfría muy lentamente y da lugar a una difusión atómica que iguala los gradientes de

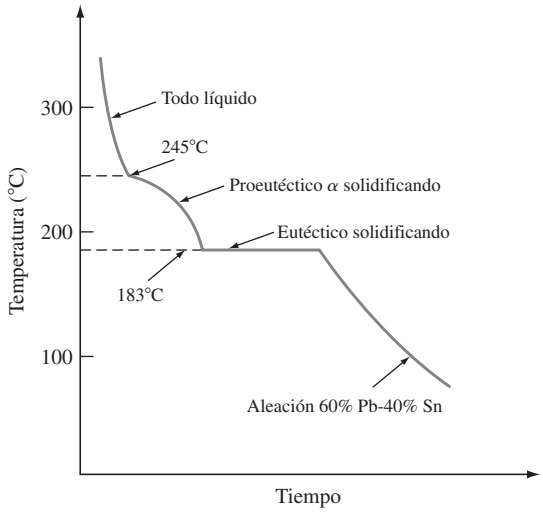


Figura 8.15
Curva esquemática curva-tiempo de enfriamiento de una aleación de 60% de Pb y 40% de Sn.

composición. A la temperatura eutéctica (183°C) todos los líquidos remanentes se solidifican por la reacción eutéctica (ecuación 8.8). Después de haberse completado la reacción eutéctica, la aleación consta del alfa proeutéctico y una mezcla eutéctica de alfa (19.2 por ciento Sn) y beta (97.5 por ciento Sn). Un posterior enfriamiento por debajo de 183°C a temperatura ambiente hace que disminuya el contenido de estaño en la fase alfa y el contenido de plomo en la fase beta. Sin embargo, a temperaturas más bajas la velocidad de difusión es muchísimo más lenta y el equilibrio no se alcanza. En la figura 8.14*b* se muestra la microestructura de una aleación de 40% de Sn-60% de Pb que se ha enfriado lentamente. Obsérvense las dentritas oscurecidas correspondientes a fase alfa rica en plomo rodeada por el material eutéctico. En la figura 8.15 se muestra una curva de enfriamiento de una aleación 60% Pb-40% de Sn. Nótese que ocurre un cambio de pendiente en el líquido a 245°C y aparece un confinamiento térmico horizontal durante la solidificación del eutéctico.

PROBLEMA DE EJEMPLO 8.4

Realice un análisis de fases de la solidificación (ideal) en el equilibrio de las aleaciones estaño-plomo en los siguientes puntos a partir del diagrama de fases de plomo-estaño de la figura 8.13:

a) En la composición eutéctica justo debajo de 183°C (temperatura eutéctica).
b) En el punto *c* a 40% Sn y 230°C
c) En el punto *d* a 40% Sn y 183°C + ΔT.
d) En el punto *e* a 40% Sn y 183°C − ΔT.

■ **Solución**

a) A la composición eutéctica (61.9 por ciento Sn) justo debajo de 183°C:

Fases presentes:	alfa	beta
Composiciones de las fases:	19.2% Sn en fase alfa	97.5% Sn en fase beta
Cantidades de las fases:	% en peso en fase alfa[5] $= \frac{97.5 - 61.9}{97.5 - 19.2}(100\%)$ $= 45.5\%$	% en peso en fase beta[5] $= \frac{61.9 - 19.2}{97.5 - 19.2}(100\%)$ $= 54.5\%$

b) En el punto *c* a 40 por ciento Sn y 230°C:

Fases presentes:	líquida	alfa
Composiciones de las fases:	48% Sn en fase líquida	15% Sn en fase alfa
Cantidades de las fases:	% en peso en fase líquida $= \frac{40 - 15}{48 - 15}(100\%)$ $= 76\%$	% en peso en fase alfa $= \frac{48 - 40}{48 - 15}(100\%)$ $= 24\%$

c) En el punto *d* a 40 por ciento Sn y 183°C + ΔT:

Fases presentes:	líquida	alfa
Composiciones de las fases:	61.9% Sn en fase líquida	19.2% Sn en fase alfa
Cantidades de las fases:	% en peso en fase líquida $= \frac{40 - 19.2}{61.9 - 19.2}(100\%)$ $= 49\%$	% en peso en fase alfa $= \frac{61.9 - 40}{61.9 - 19.2}(100\%)$ $= 51\%$

d) En el punto *e* a 40 por ciento Sn y 183°C − ΔT:

Fases presentes:	alfa	beta
Composiciones de las fases:	19.2% Sn en fase alfa	97.5% Sn en fase beta
Cantidades de las fases:	% en peso en fase alfa $= \frac{97.5 - 40}{97.5 - 19.2}(100\%)$ $= 73\%$	% en peso en fase beta $= \frac{40 - 19.2}{97.5 - 19.2}(100\%)$ $= 27\%$

[5] Obsérvese que en los cálculos de la regla de la palanca se utiliza la relación del segmento de línea de enlace que está lo *más lejos* de la fase para la cual está siendo determinado el porcentaje en peso, frente a la línea de enlace completa.

PROBLEMA DE EJEMPLO 8.5

Un kilogramo de una aleación de 70 por ciento en Pb y 30 por ciento en Sn, se enfría lentamente a partir de 300°C. Utilice el diagrama de fases estaño-plomo de la figura 8.13 y calcule lo siguiente:

a) El porcentaje en peso del líquido y del proeutéctico alfa a 250°C.
b) El porcentaje en peso del líquido y del proeutéctico alfa justo por encima de la temperatura eutéctica (183°C) y el peso en kilogramos de esas fases.
c) El peso en kilogramos de alfa y beta formados por la reacción eutéctica.

■ Solución

a) De la figura 8.13 a 250°C,

$$\%\text{ en peso de líquido}^6 = \frac{30 - 12}{40 - 12}(100\%) = 64\% \blacktriangleleft$$

$$\%\text{ en peso proeutéctico } \alpha^6 = \frac{40 - 30}{40 - 12}(100\%) = 36\% \blacktriangleleft$$

b) El porcentaje en peso del líquido y proeutéctico alfa justo por encima de la temperatura eutéctica, 183°C + ΔT, es

$$\%\text{ en peso de líquido} = \frac{30 - 19.2}{61.9 - 19.2}(100\%) = 25.3\% \blacktriangleleft$$

$$\%\text{ en peso proeutéctico } \alpha = \frac{61.9 - 30.0}{61.9 - 19.2}(100\%) = 74.7\% \blacktriangleleft$$

$$\text{Peso de la fase líquida} = 1\text{ kg} \times 0.253 = 0.253\text{ kg} \blacktriangleleft$$

$$\text{Peso de proeutéctico } \alpha = 1\text{ kg} \times 0.747 = 0.747\text{ kg} \blacktriangleleft$$

c) A 83°C − ΔT,

$$\%\text{ peso total } \alpha\text{ (proeutéctico } \alpha + \text{eutéctico } \alpha) = \frac{97.5 - 30}{97.5 - 19.2}(100\%) = 86.2\%$$

$$\%\text{ de peso total } \beta\text{ (eutéctico } \beta) = \frac{30 - 19.2}{97.5 - 19.2}(100\%) = 13.8\%$$

$$\text{Peso total de } \alpha = 1\text{ kg} \times 0.862 = 0.862\text{ kg}$$

$$\text{Peso total de } \beta = 1\text{ kg} \times 0.138 = 0.138\text{ kg}$$

La cantidad de proeutéctico alfa permanecerá constante antes y después de la reacción eutéctica. Por tanto,

$$\text{Peso de } \alpha \text{ originado por la reacción eutéctica} = \text{total } \alpha - \text{proeutéctico } \alpha = 0.862\text{ kg} - 0.747\text{ kg} = 0.115\text{ kg} \blacktriangleleft$$

$$\text{Peso de } \beta \text{ originado por la reacción eutéctica} = \text{total } \beta = 0.138\text{ kg} \blacktriangleleft$$

[6]Véase nota 5 en el problema de ejemplo 8.4.

PROBLEMA DE EJEMPLO 8.6

Una aleación de plomo y estaño (Pb-Sn) contiene 64% en peso de material proeutéctico α y 36% en peso de material eutéctico $\alpha + \beta$ a 183°C $- \Delta T$. Calcule la composición promedio de esta aleación (véase la figura 8.13).

■ Solución

Supóngase que x es el porcentaje en peso de Sn en la aleación desconocida. Puesto que esta aleación contiene 64% en peso de proeutéctico α, la aleación debe ser hipoeutéctica, y x por tanto estará localizada entre 19.2 y 61.9% en peso de Sn, como aparece en la figura EP8.6. A 183°C + ΔT, usando la figura EP8.6 y la regla de la palanca, resulta

$$\%\ \text{proeutéctico}\ \alpha = \frac{61.9 - x}{61.9 - 19.2}(100\%) = 64\%$$

o

$$61.9 - x = 0.64(42.7) = 27.3$$
$$x = 34.6\%$$

De este modo, la aleación está formada por 34.6 por ciento de Sn y 65.4 por ciento de Pb. ◀ Obsérvese que se utiliza el cálculo de la regla de la palanca por encima de la temperatura eutéctica, ya que el porcentaje de proeutéctico α permanece constante tanto por encima como por debajo de la temperatura eutéctica.

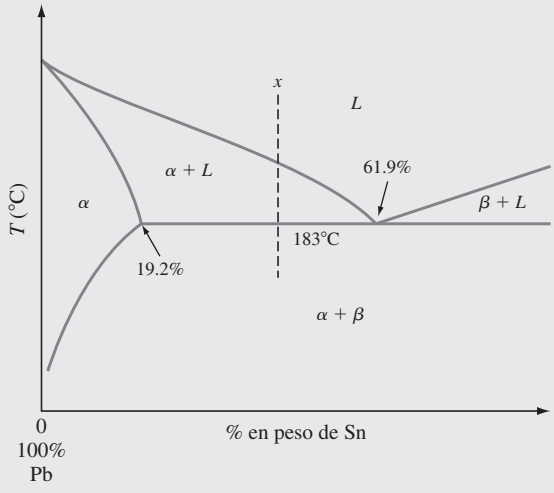


Figura EP8.6
Extremo rico en plomo en el diagrama de fases Pb-Sn.

IceNine

En una reacción binaria eutéctica, las dos fases sólidas ($\alpha + \beta$) pueden tener varias morfologías. En la figura 8.16 se muestran esquemáticamente algunos tipos de estructuras eutécticas. La forma que se origina depende de varios factores. Uno de importancia fundamental es la minimización de la energía libre en las interfases $\alpha - \beta$. Otro factor importante que determina la forma del eutéctico es la manera en que las

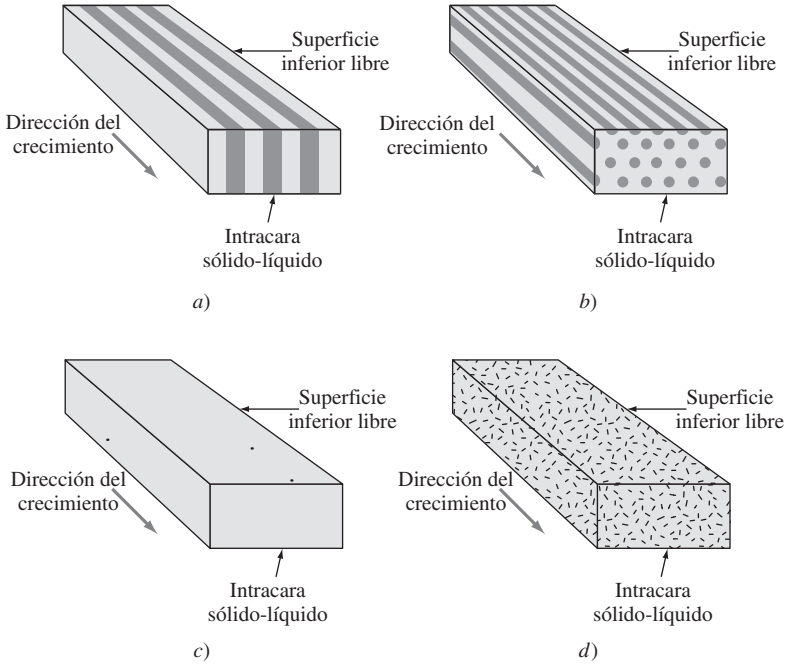


Figura 8.16
Ilustración esquemática de varias estructuras eutécticas: *a*) lamelar, *b*) varilla, *c*) globular, *d*) acicular.
(De W. C. Winegard, "An Introduction to the Solidification of Metals", Institute of Metals, Londres, 1964.)

dos fases (α y β) forman un núcleo y crecen. Por ejemplo, los tipos eutécticos de varilla y lámina se forman cuando no se requiere la nucleación repetida de las dos fases en ciertas direcciones. Un ejemplo de una e*structura eutéctica lamelar* formada por una reacción eutéctica de Pb-Sn aparece en la figura 8.17. Las estructuras eutécticas lamelares son muy comunes. En la figura 8.14*a* se muestra una estructura eutéctica mezclada irregularmente, encontrada en los sistemas Pb-Sn.

8.8 SISTEMAS DE ALEACIONES BINARIAS PERITÉCTICAS

Otro tipo de reacción que frecuentemente aparece en los diagramas de fase binarios en equilibrio, es la **reacción peritéctica**. Esta reacción se presenta comúnmente como parte de los diagramas de equilibrio más complicados, particularmente si los puntos de fusión de los dos componentes son completamente diferentes. En la reacción peritéctica, una fase líquida reacciona con una fase sólida para formar una fase sólida nueva y diferente. De un modo general, la reacción peritéctica puede representarse de la forma siguiente:

$$\text{Líquido} + \alpha \xrightarrow[\text{enfriamiento}]{} \beta \qquad \textbf{(8.9)}$$

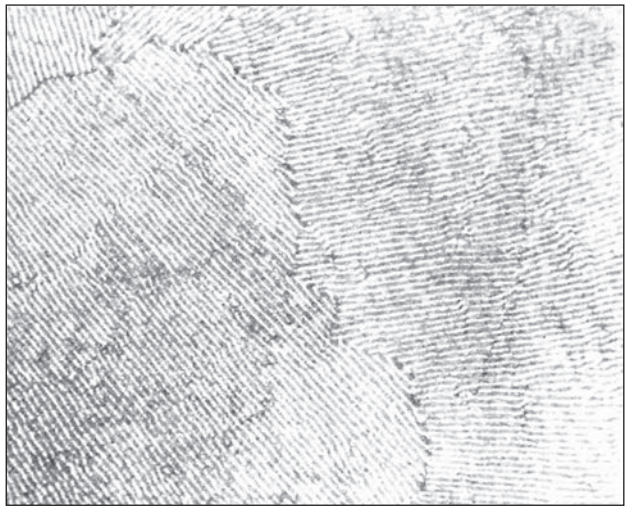


Figura 8.17
Estructura eutéctica laminar formada por la reacción eutéctica Pb-Sn. (Ampliación 500×.)
(Según W. G. Moffatt et al., "Structure and Properties of Materials", vol. I, Wiley, 1964.)

En la figura 8.18 se muestra la región del diagrama de fase de la aleación hierro-níquel. En este diagrama aparecen dos fases sólidas (δ y γ) y una fase líquida. La fase δ es una solución sólida de níquel en hierro BCC, mientras que la fase γ es una solución sólida de níquel en hierro FCC. La temperatura peritéctica de 1 517°C y la composición peritéctica de 4.3% en peso de níquel en hierro define el punto peritéctico *c* en la figura 8.18. Este punto es invariante, ya que las tres fases δ, γ y líquida, coexisten en el equilibrio. La reacción peritéctica ocurre cuando una aleación de hierro con 4.3% en peso de níquel, que ha sido lentamente enfriada, pasa a través de la temperatura peritéctica de 1 517°C. Esta reacción puede representarse como

$$\text{Líquido (5.4\% en peso de Ni)} + \delta\ \text{(4.0\% en peso de Ni)} \xrightarrow[\text{enfriamiento}]{1\,517^\circ\text{C}} \underset{\text{(4.3\% en peso de Ni)}}{\gamma} \qquad \textbf{(8.10)}$$

Para comprender mejor la reacción peritéctica, considérese ahora una aleación de Fe-4.3% en peso de Ni (composición peritéctica) que se enfría lentamente desde 1 550°C hasta ligeramente por debajo de los 1 517°C (puntos *a* a *c* en la figura 8.18). Desde los 1 550 hasta los 1 525°C (puntos *a* a *b* en la figura 8.18) la aleación se enfría como un líquido homogéneo de Fe-4.3% en peso de Ni. Cuando el líquido cruza la barrera de los 1 525°C (punto *b*), comienza a formarse el sólido δ. Un enfriamiento posterior hasta el punto *c* implica que cada vez se forma más sólido δ. En la temperatura peritéctica de 1 517°C (punto *c*) el sólido δ de 4.0 por ciento de Ni y el líquido de 5.4 por ciento de Ni están en equilibrio, y a esta temperatura todo el líquido reacciona con toda la fase sólida δ para producir una nueva fase sólida γ de 4.3 por ciento de Ni. La aleación permanece como una solución sólida γ de fase única hasta que ocurre otro cambio de fase a una temperatura más baja, la cual ahora no es de interés. La regla de

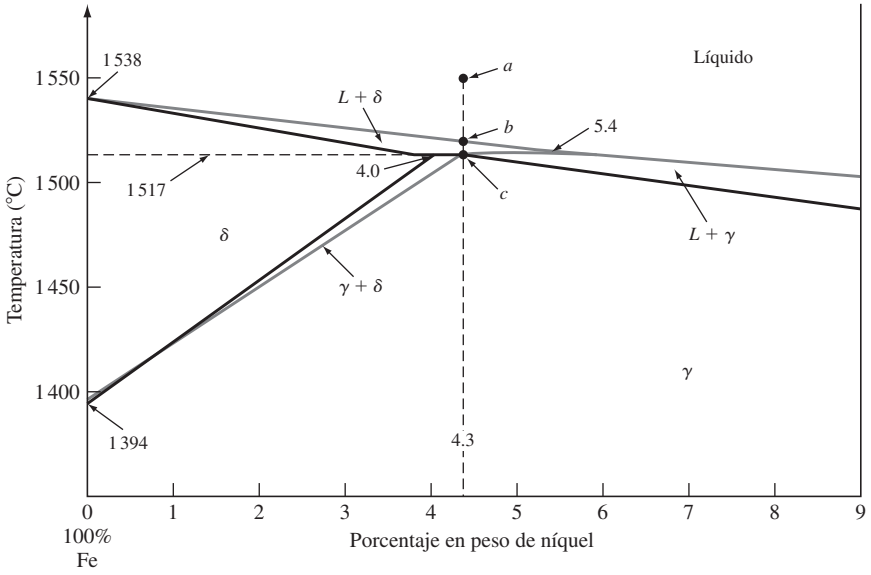


Figura 8.18
La región peritéctica del diagrama de fases-níquel. El punto peritéctico está localizado en 4.3% Ni y 1 517°C, y es el punto *c*.

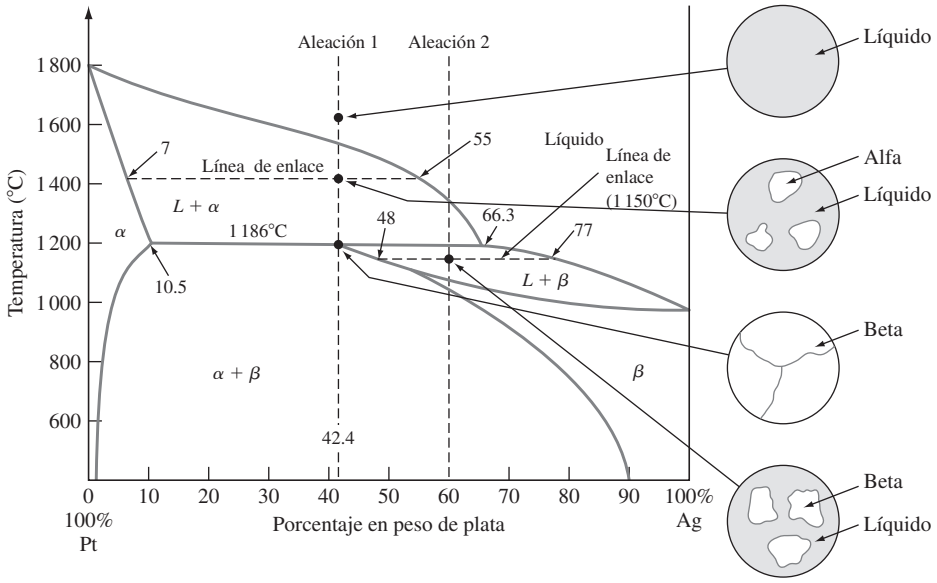
IceNine

la palanca puede aplicarse en las regiones de doble fase del diagrama peritéctico de la misma forma que se hace para el diagrama eutéctico.

Si una aleación en el sistema Fe-Ni tiene menos de 4.3 por ciento de Ni y se enfría lentamente desde el estado líquido a través de la región líquido $+\delta$, habrá un exceso de fase δ después de que se complete la reacción peritéctica. De forma análoga, si una aleación de Fe-Ni con más de 4.3 por ciento de Ni pero menos de un 5.4 por ciento de Ni, se enfría lentamente desde el estado líquido pasando a través de la región $\delta+$ líquido, habrá un exceso en la fase líquida una vez que se completa la reacción peritéctica.

El diagrama de fases binario en equilibrio de la aleación platino-plata es un ejemplo excelente de un sistema que tiene una reacción peritéctica simple e invariante (figura 8.19). En este sistema la reacción peritéctica $L + \alpha \rightarrow \beta$ se presenta con 42.4 por ciento Ag y a 1 186°C. En la figura 8.20 se ilustra esquemáticamente cómo progresa en forma isotérmica la reacción peritéctica del sistema Pt-Ag. En el problema de ejemplo 8.7, los análisis de fases se realizan en varios puntos de este diagrama de fase. Sin embargo, durante la solidificación natural de las aleaciones peritécticas, la salida del estado de equilibrio es notable debido a la velocidad de difusión atómica relativamente lenta a través de la fase sólida que origina esta reacción.

Durante el equilibrio o en el enfriamiento lento de una aleación de composición peritéctica a través de la temperatura peritéctica, toda la fase sólida alfa reacciona con todo el líquido para producir una nueva fase sólida beta, como se indica en la figura 8.20. Sin embargo, durante la solidificación rápida de una aleación fundida a través de la temperatura peritéctica, tiene lugar un fenómeno de no equilibrio llamado *circundante* o de *envoltura*. Durante la reacción peritéctica de $L + \alpha \rightarrow \beta$, la fase beta creada por la reacción peritéctica rodea o envuelve a la alfa primaria, como se muestra en la figu-



IceNine

Figura 8.19
Diagrama de fases platino-plata. El aspecto más importante de este diagrama es la reacción invariante peritéctica para 42.4% de Ag y 1186°C. En el punto peritéctico pueden coexistir el líquido (66.3% Ag), alfa (10.5% Ag) y beta (42.4% Ag).

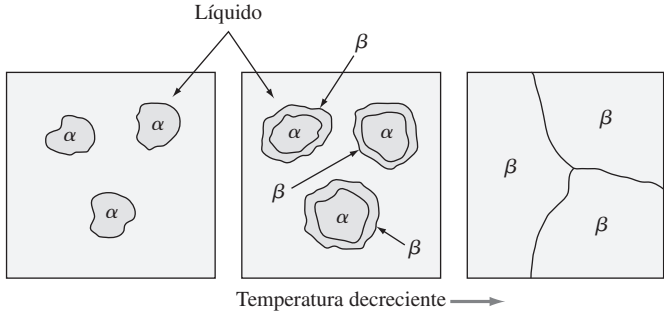


Figura 8.20
Representación esquemática del desarrollo progresivo de la reacción peritéctica líquido + $\alpha \rightarrow \beta$.

PROBLEMA DE EJEMPLO 8.7

Realice los análisis de fase de los siguientes puntos en el diagrama de fase en equilibrio de la aleación Pt-Ag de la figura 8.19.

a) En el punto a 42.4 por ciento Ag y 1 400°C.
b) En el punto a 42.4 por ciento Ag y 1 186°C + ΔT.
c) En el punto a 42.4 por ciento Ag y 1 186°C − ΔT.
d) En el punto con 60 por ciento Ag y 1 150°C.

■ Solución

a) Para 42.4 por ciento Ag y 1 400°C:

Fases presentes:	líquida	alfa
Composiciones de las fases:	55% Ag en fase líquida	7% Ag en fase alfa
Cantidades de las fases:	% en peso en fase líquida $= \frac{42.4 - 7}{55 - 7}(100\%)$ $= 74\%$	% en peso en fase alfa $= \frac{55 - 42.4}{55 - 7}(100\%)$ $= 26\%$

b) Para 42.4 por ciento Ag y 1 186°C + ΔT:

Fases presentes:	líquida	alfa
Composiciones de las fases:	66.3% Ag en fase líquida	10.5% Ag en fase alfa
Cantidades de las fases:	% en peso en fase líquida $= \frac{42.4 - 10.5}{66.3 - 10.5}(100\%)$ $= 57\%$	% en peso en fase alfa $= \frac{66.3 - 42.4}{66.3 - 10.5}(100\%)$ $= 43\%$

c) Para 42.4 por ciento Ag y 1 186°C − ΔT:

Fases presentes:	sólo beta
Composiciones de las fases:	42.4% Ag en fase beta
Cantidades de las fases:	100% fase beta

d) Para 60 por ciento Ag y 1 150°C:

Fases presentes:	líquida	beta
Composiciones de las fases:	77% Ag en fase líquida	48% Ag en fase beta
Cantidades de las fases:	% en peso en fase líquida $= \frac{60 - 48}{77 - 48}(100\%)$ $= 41\%$	% en peso en fase beta $= \frac{77 - 60}{77 - 48}(100\%)$ $= 59\%$

ra 8.21. Ya que la fase beta formada es una fase sólida y como la difusión en estado sólido es relativamente lenta, la fase beta formada alrededor de la fase alfa crea una barrera de difusión y se produce la reacción peritéctica a una velocidad siempre decreciente. De este modo, cuando la aleación peritéctica se funde de forma rápida, se origina la formación de núcleos durante la formación de la fase alfa primaria (figura 8.22 a lo largo de α_1 a α'_4), y tiene lugar el recubrimiento de la fase α nucleada por parte de la fase de β durante la reacción peritéctica. En la figura 8.23 se ilustran esquemá-

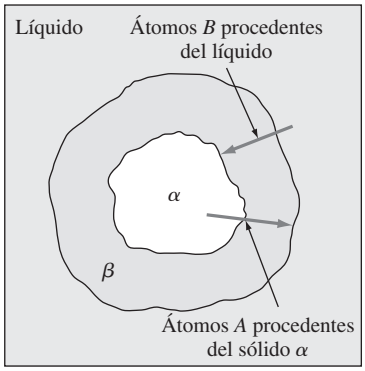


Figura 8.21
Región circundante durante la reacción peritéctica. La lenta velocidad de difusión de los átomos desde el líquido hasta la fase alfa hace que la fase beta encapsule a la fase alfa.

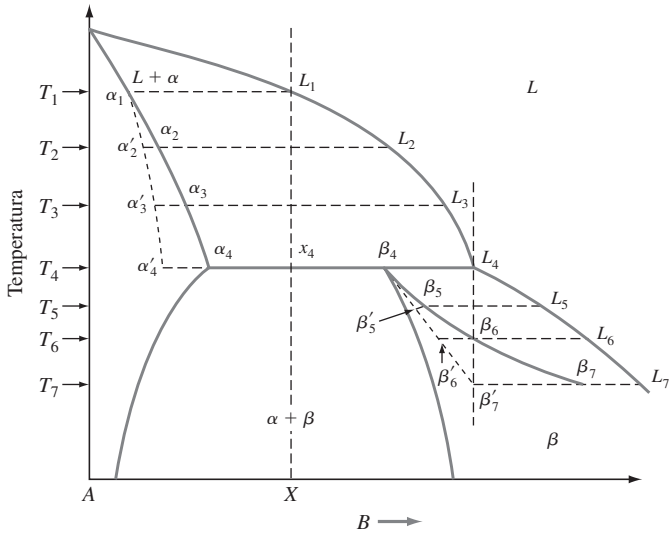


Figura 8.22
Diagrama de fase binario peritéctico hipotético para ilustrar cómo ocurre la formación del gradiente de concentración durante la solidificación natural. El rápido enfriamiento origina el cambio de no equilibrio a solidus α_1 a α'_4 y β_4 a β'_7 y permite la segregación de la fase alfa y de la fase beta. El fenómeno del encapsulamiento también tiene lugar durante la solidificación rápida de una aleación del tipo peritéctico.
(Según F. Rhines, "Phase Diagrams in Metallurgy", McGraw-Hill, 1956, p. 86.)

ticamente estas estructuras de no equilibrio combinadas. En la figura 8.24 se muestra la microestructura de una aleación de 60% Ag-40% Pt que ha sido moldeada rápidamente. Esta estructura muestra la fase alfa nucleada encapsulada por la fase beta.

8.9 SISTEMAS BINARIOS MONOTÉCTICOS

Otra reacción invariante de tres fases que se presenta en algunos diagramas de fase binarios es la **reacción monotéctica**, en la cual una fase líquida se transforma en una fase sólida y en otra líquida como

$$L_1 \xrightarrow{\text{enfriamiento}} \alpha + L_2 \qquad \textbf{(8.11)}$$

En un determinado margen de composiciones, los dos líquidos son inmiscibles como ocurre con el aceite en el agua y, por tanto, constituyen fases individuales. Esta reacción de este tipo ocurre en un sistema de cobre-plomo a 955°C y 36 por ciento Pb, como se muestra en la figura 8.25. El diagrama de fases plomo-cobre tiene un punto eutéctico a 326°C y 99.94% Pb, y como resultado se forman a temperatura ambiente soluciones sólidas terminales de plomo casi puro (0.007 por ciento Cu) y cobre puro (0.005 por ciento de Pb). En la figura 8.26 se muestra la microestructura de una aleación monotéctica fundida de Cu-36% Pb. Obsérvese la nitidez de separación de la fase rica en plomo (oscuro) y la matriz de cobre (clara).

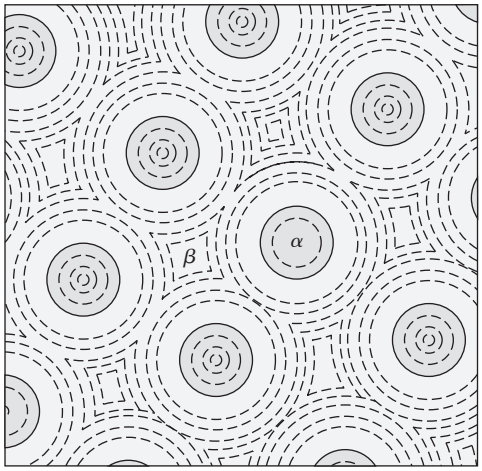


Figura 8.23
Representación esquemática de una región circundante o de encapsulamiento en una fundición obtenida por reacción peritéctica. Un residuo de material α primario con gradiente de concentración se ha representado por círculos cerrados concéntricos en torno a pequeños círculos punteados. Circundando a la fase α con gradiente de concentración se encuentra una capa de fase β de composición peritéctica. El resto del espacio está ocupado por la fase β con gradiente de concentración, representada por líneas curvas punteadas.
(Según F. Rhines, "Phase Diagrams in Metallurgy", McGraw-Hill, 1956, p. 87.)

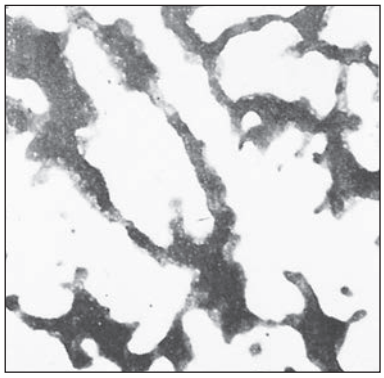
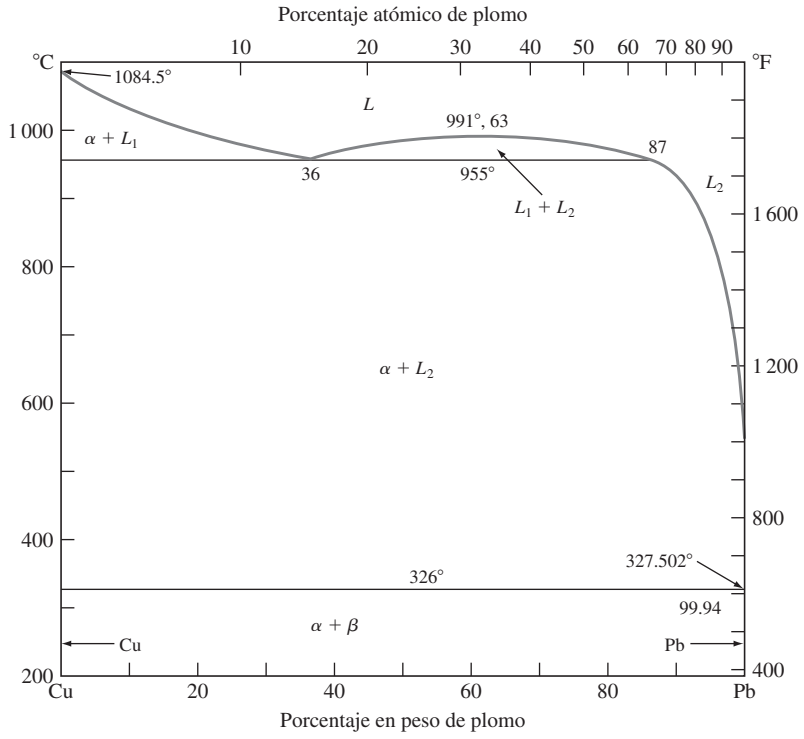


Figura 8.24
Aleación de fundición hiperperitéctica 60% Ag-40% Pt. Las superficies blancas y grises son de fase α residual con gradiente de concentración; las áreas con dos tonos oscuros son de fase β, siendo las porciones exteriores de composición peritéctica y la zona central más oscura núcleos de fase β que se forman a temperaturas por debajo de la temperatura de la reacción peritéctica. (Ampliación 1 000 $\times$.)
(Por cortesía de F. Rhines.)

La adición de plomo en pequeñas proporciones hasta aproximadamente 0.5 por ciento a muchas aleaciones (por ejemplo, latones Cu-Zn) se hace para conseguir una mayor facilidad en el maquinado de tales aleaciones, reduciendo suficientemente la ductilidad con el fin de lograr que las virutas metálicas maquinadas se vayan desprendiendo de la pieza que se está trabajando. Esta adición de plomo en pequeñas cantidades sólo reduce ligeramente la resistencia de la aleación. La utilización de aleaciones de plomo también se extiende a los cojinetes, donde pequeñas cantidades de plomo se difunden a las superficies sometidas al desgaste entre los cojinetes y el eje, reduciendo la fricción.

8.10 REACCIONES INVARIANTES

Se han expuesto hasta ahora tres clases de reacciones invariantes que se presentan usualmente en los diagramas de fase binarios: las eutécticas, peritécticas y monotécticas. En la tabla 8.1 se resumen estas reacciones y se muestran las características de sus



IceNine

Figura 8.25
Diagrama de fases plomo-cobre. La característica más importante de este diagrama es la reacción invariante monotéctica a 36% Pb y 955°C. En el punto monotéctico pueden coexistir las fases α (100% Cu), L_1 (36% Pb) y L_2 (87% Pb). Hay que tener en cuenta que el Pb y el Cu son insolubles uno en otro.
("Metals Handbook", vol. 8: "Metallography, Structures, and Phase Diagrams", 8a. ed., American Society for Metals, 1973, p. 296.)

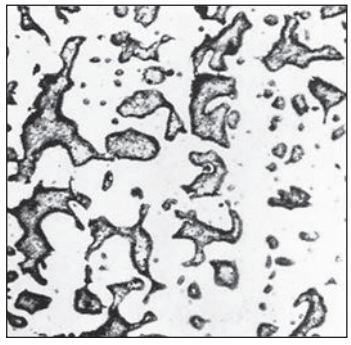
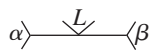
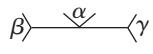
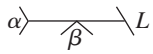
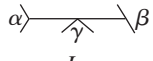
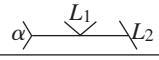


Figura 8.26
Microestructura de una aleación monotéctica de fundición de Cu-36% Pb. Las áreas claras son las matrices ricas en Cu del constituyente monotéctico; las áreas oscuras son la porción rica en Pb, que existía como L_2 a la temperatura monotéctica. (Ampliación 100×.)
(Cortesía de F. Rhines.)

Tabla 8.1 Tipos de reacciones invariantes de tres fases que se presentan en diagramas de fases binarios

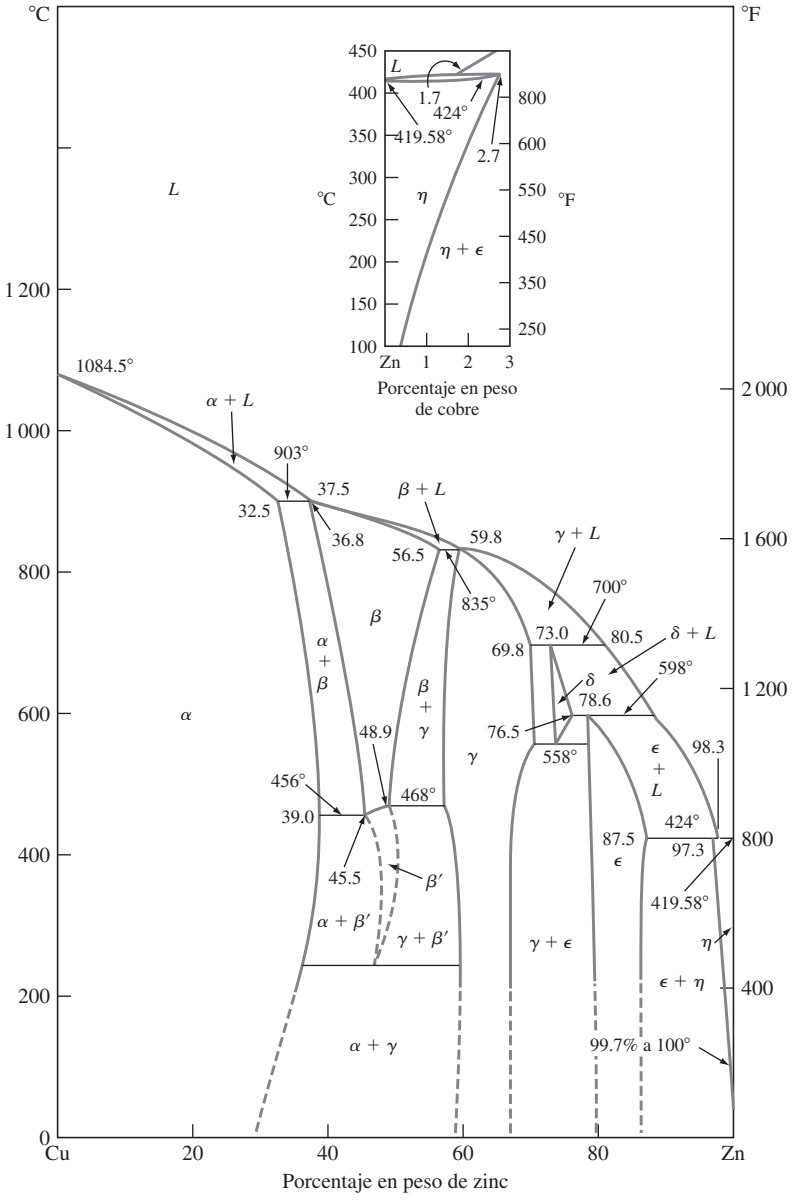
Nombre de la reacción	Ecuación	Característica del diagrama de fases
Eutéctica	$L \xrightarrow{\text{enfriamiento}} \alpha + \beta$	
Eutectoide	$\alpha \xrightarrow{\text{enfriamiento}} \beta + \gamma$	
Peritéctica	$\alpha + L \xrightarrow{\text{enfriamiento}} \beta$	
Peritectoide	$\alpha + \beta \xrightarrow{\text{enfriamiento}} \gamma$	
Monotéctica	$L_1 \xrightarrow{\text{enfriamiento}} \alpha + L_2$	

diagramas de fase en sus puntos de reacción. Otras dos reacciones invariantes importantes que se presentan en sistemas binarios son los *tipos eutectoide* y *peritectoide*. Las reacciones eutéctica y la eutectoide son similares en el hecho de que se forman dos fases sólidas por enfriamiento a partir de una fase. Sin embargo, en la reacción eutectoide, la fase en descomposición es sólida, mientras que en la reacción eutéctica la fase en descomposición es líquida. En la reacción peritectoide dos fases sólidas reaccionan para formar una nueva fase sólida, mientras que en la reacción peritéctica una fase sólida reacciona con una líquida para producir una nueva fase sólida. Es interesante hacer notar que las reacciones peritéctica y peritectoide son inversas de las correspondientes reacciones eutéctica y eutectoide. Las temperaturas y composiciones de las fases en reacción son fijas para todas estas reacciones invariantes. Esto es, de acuerdo con la regla de la fase, existen cero grados de libertad en los puntos de reacción.

8.11 DIAGRAMAS DE FASES CON FASES Y COMPUESTOS INTERMEDIOS

Los diagramas de fase tratados anteriormente han sido relativamente simples, contienen sólo un pequeño número de fases y han presentado sólo una reacción invariante. Muchos diagramas de equilibrio son complejos y a menudo muestran fases o compuestos intermedios. En la terminología de los diagramas de fases es conveniente distinguir entre dos tipos de soluciones sólidas: **fases terminales** y **fases intermedias**. Las fases terminales en solución sólida se presentan al final de los diagramas de fase, en los límites de los componentes puros. Las soluciones sólidas α y β del diagrama Pb-Sn (figura 8.13) constituyen un ejemplo. Las fases en solución sólida intermedias se presentan en un rango de composiciones dentro del diagrama de fases y están separadas de otras fases en un diagrama binario, por regiones de dos fases. El diagrama de fases Cu-Zn posee ambas fases, terminal e intermedia (figura 8.27). En este sistema α y η son fases terminales y β, γ, δ y ϵ son fases intermedias. El diagrama de fases Cu-Zn cuenta con cinco puntos peritécticos invariantes y con un punto eutectoide invariante en el punto más bajo de la región de la fase intermedia δ.

Las fases intermedias no están restringidas a los diagramas de fase metálicos binarios. En el diagrama de fase para las cerámicas del sistema Al_2O_3-SiO_2 se forma una



IceNine

Figura 8.27
Diagrama de fases cobre-zinc. Este diagrama tiene las fases α y η terminales y las fases β, γ, δ y ϵ intermedias. Hay cinco puntos peritécticos invariantes y un punto eutectoide.
(Según "Metals Handbook", vol. 8: "Metallography, Structures, and Phase Diagrams", 8a. ed., American Society for Metals, 1973, p. 301.)

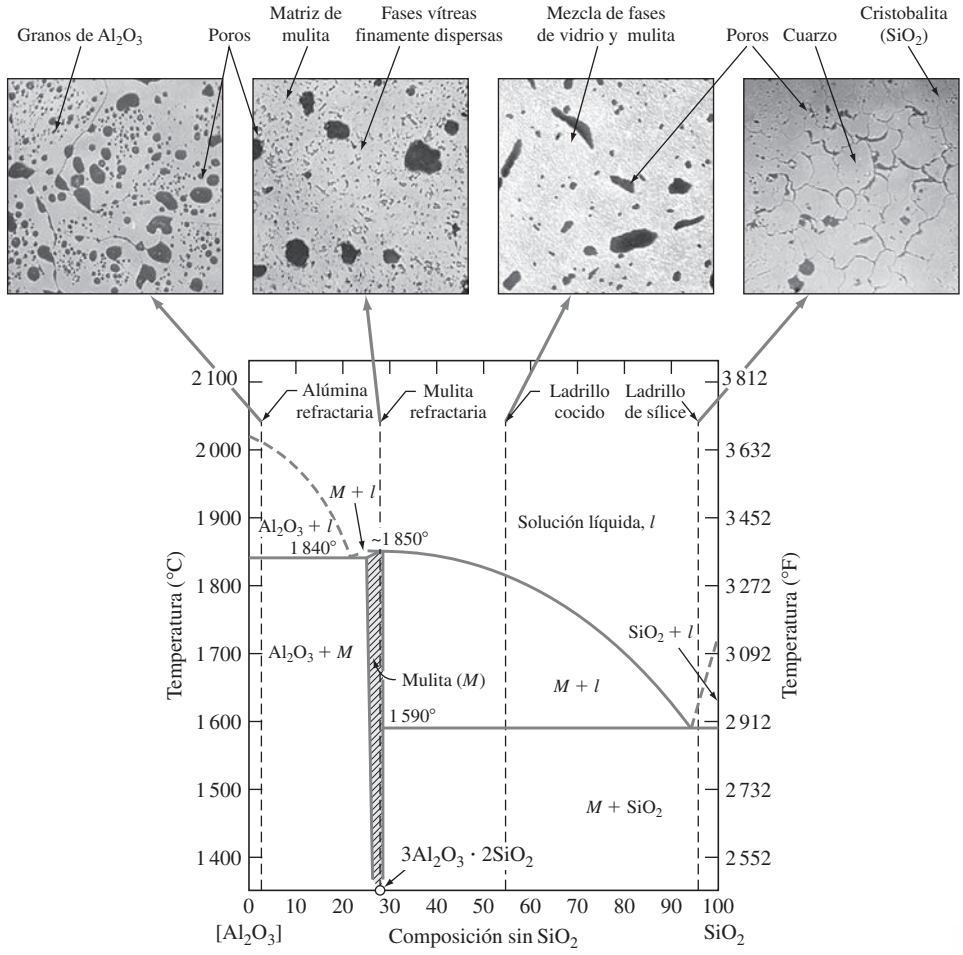
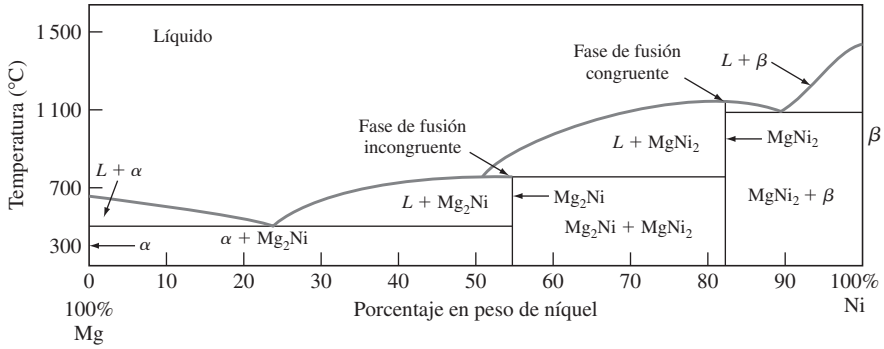


Figura 8.28
Diagrama de fases del sistema Al_2O_3-SiO_2 que contiene mulita como fase intermedia. Se muestran composiciones típicas de refractarios conteniendo Al_2O_3 y SiO_2 como sus principales componentes.
(Según A. G. Guy, "Essentials of Materials Science", McGraw-Hill, 1976.)

fase intermedia llamada *mulita*, la cual incluye el compuesto $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ (figura 8.28). Muchos materiales refractarios[7] poseen Al_2O_3 y SiO_2 como componentes principales. Estos materiales se expondrán en el capítulo 11 que trata sobre los materiales cerámicos.

Si el compuesto intermedio se forma entre dos metales, el material resultante es un material cristalino denominado *compuesto intermetálico* o sencillamente un *intermetálico*. Hablando en términos generales, los compuestos intermetálicos debieran tener una fórmula química definida o ser estequiométricos (razón fija de átomos parti-

[7]Un refractario es un material cerámico resistente al calor.



IceNine

Figura 8.29
Diagrama de fases magnesio-níquel. En este diagrama hay dos compuestos intermetálicos, Mg_2Ni y $MgNi_2$.
("Metals Handbook", 8a. ed., vol. 8, American Society for Metals, 1973, p. 314.)

cipantes). Sin embargo, en muchos casos ocurre un grado determinado de sustitución atómica que da cabida a grandes desviaciones con respecto a la estequiometría. En un diagrama de fases, los intermetálicos aparecen ya sea como una sola línea vertical, que evidencia la naturaleza estequiométrica del compuesto (véase la línea $TiNi_3$ en la figura EP8.8), o en ocasiones como un intervalo de composición, lo que evidencia un compuesto no estequiométrico (por ejemplo, la sustitución de átomos Zn por Cu o de Cu por Zn en las fases β y γ del diagrama de fases Cu-Zn mostrado en la figura 8.27). Los compuestos intermetálicos poseen, en su mayoría, una mezcla de enlaces metálicos-iónicos o metálicos-covalentes. El porcentaje de enlaces iónicos o covalentes formados en compuestos intermetálicos depende de la diferencia en electronegatividades de los elementos participantes (véase la sección 2.9).

El diagrama de fase Mg-Ni contiene compuestos intermedios Mg_2Ni y $MgNi_2$, que están enlazados principalmente de forma metálica y tienen composiciones fijas y estequiometrías definidas (figura 8.29). Se dice que el compuesto intermetálico $MgNi_2$ es un compuesto punto de *fusión congruente*, ya que mantiene su composición fija hasta el punto de fusión. Por otra parte el Mg_2Ni es un compuesto de punto de *fusión incongruente*, ya que bajo calentamiento sufre una descomposición peritéctica a 761°C transformándose en las fases líquida y en una fase sólida $MgNi_2$. Otros ejemplos de compuestos intermedios que existen en los diagramas de fases son el Fe_3C y el Mg_2Si. En el Fe_3C la unión es principalmente de carácter metálico, pero en el Mg_2Si la unión es principalmente covalente.

PROBLEMA DE EJEMPLO 8.8

Considere el diagrama de fases titanio-níquel (Ti-Ni) de la figura EP8.8. Este diagrama de fases tiene seis puntos donde coexisten tres fases. Para cada uno de estos puntos trifásicos:

a) Coloque en una lista las coordenadas de composición (porcentaje en peso) y temperatura para cada punto.
b) Escriba la reacción invariante que ocurre durante el enfriamiento lento de la aleación Ti-Ni a través de cada punto.
c) Nombre el tipo y reacción invariante que tiene lugar en cada punto.

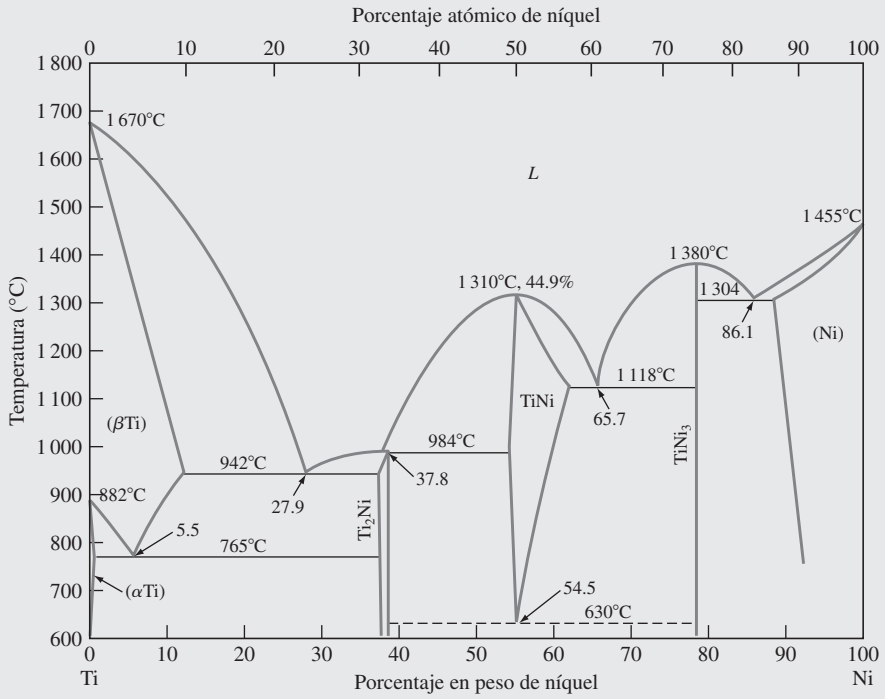


Figura EP8.8
Diagrama de fases del titanio-níquel.
(Según Binary Alloy Phase Diagrams, ASM Int., 1986, p. 1768.)

IceNine

■ Solución

a) i) 5.5% en peso de Ni, 765°C
ii) (β Ti) $\longrightarrow$ (α Ti) + Ti_2Ni
iii) Reacción eutectoide

b) i) 27.9% en peso de Ni, 942°C
ii) $L \longrightarrow$ (β Ti) + Ti_2Ni
iii) Reacción eutéctica

c) i) 37.8% en peso de Ni, 984°C
ii) L + TiNi $\longrightarrow$ Ti_2Ni
iii) Reacción peritéctica

d) i) 54.5% en peso de Ni, 630°C
ii) TiNi $\longrightarrow$ Ti_2Ni + $TiNi_3$
iii) Reacción eutectoide

e) i) 65.7% en peso de Ni, 1 118°C
ii) $L \longrightarrow$ TiNi + $TiNi_3$
iii) Reacción eutéctica

f) i) 86.1% en peso de Ni, 1 304°C
ii) $L \longrightarrow$ $TiNi_3$ + (Ni)
iii) Reacción eutéctica

8.12 DIAGRAMAS DE FASES TERNARIOS

Hasta ahora sólo se ha hablado de diagramas de fases binarios en los que hay dos componentes. Ahora se examinarán los diagramas de fases ternarios, que tienen tres componentes. Los diagramas de fases ternarios usualmente se construyen utilizando un triángulo equilátero como base. Las composiciones de los sistemas ternarios se pre-

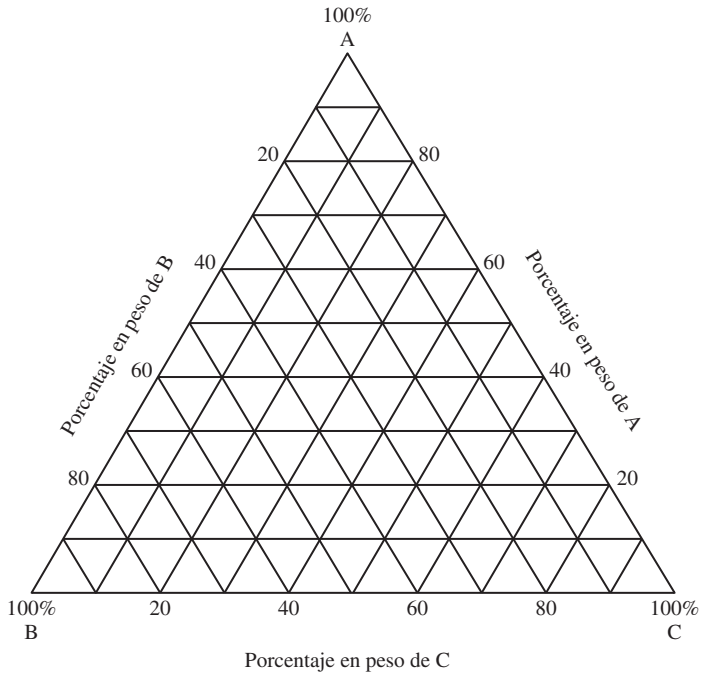


Figura 8.30
Base de la composición de un diagrama de fases ternario de un sistema con componentes A, B y C.

sentan con el componente puro en cada extremo del triángulo. En la figura 8.30 se muestra la composición base de un diagrama de fase ternario para aleaciones de metales que contienen metales puros A, B y C. Las composiciones de las aleaciones binarias AB, BC y AC están representadas en los tres lados del triángulo.

Los diagramas de fases ternarios con una base triangular se construyen usualmente a una presión constante de 1 atm. La temperatura puede representarse de manera uniforme a lo largo de todo el diagrama. Este tipo de diagrama ternario se llama *sección isotérmica*. Para mostrar un rango de temperaturas a composiciones variables, puede construirse una figura con la temperatura en un eje vertical con una composición de base triangular. Sin embargo, por lo común, se dibujan líneas de contorno de temperatura sobre el mismo triángulo para indicar rangos de temperatura del mismo modo que en un mapa topográfico plano se representan las diferentes elevaciones del terreno.

Considérese ahora la determinación de la composición en una aleación ternaria indicada por un punto en un diagrama ternario como el mostrado en la figura 8.30. En esta figura el vértice *A* del triángulo indica 100 por ciento de metal A, el vértice *B* indica 100 por ciento de metal B, y el vértice *C* indica 100 por ciento de metal C. El porcentaje en peso de cada metal puro en la aleación se determina del modo siguiente: se dibuja una línea perpendicular desde el vértice de un metal puro hasta el lado opuesto a ese vértice del triángulo, y se mide la distancia *desde* el lado al vértice a lo largo de la perpendicular como una fracción del 100 por ciento de la línea completa. Este porcentaje es el del peso del metal puro de ese vértice en la aleación. En el problema de ejemplo 8.9 se explica este procedimiento con más detalle.

El diagrama de fases ternario del hierro, cromo y níquel es importante, puesto que el acero inoxidable de mayor interés comercial tiene una composición esencialmente de 74 por ciento de hierro, 18 por ciento de cromo y 8 por ciento de níquel. En la fi-

PROBLEMA DE EJEMPLO 8.9

Determine el porcentaje en peso de los metales A, B y C de una aleación ternaria ABC en el punto *x* de la red del diagrama de fase ternario mostrado en la figura EP8.9.

■ Solución

La composición en un punto de una red del diagrama de fase ternario que se muestra en la figura EP8.9, se establece por separado determinando las composiciones de cada uno de los metales puros del diagrama. Para determinar el porcentaje de *A* en el punto *x* de la figura EP8.9, se dibuja primero la línea perpendicular *AD* desde el vértice *A* hasta el punto *D* en el lado del triángulo opuesto al vértice *A*. La longitud total de la línea desde *D* hasta *A* representa 100 por ciento de *A*. En el punto *D* el porcentaje de *A* en la aleación es cero. El punto *x* se encuentra sobre una línea de isocomposición con 40 por ciento de *A*, y de este modo, el porcentaje de *A* en la aleación es de 40 por ciento. De la misma manera, dibújese la línea *BE* para determinar que el porcentaje de *B* en la aleación es también de 40 por ciento. Se dibuja una tercera línea *CF* y el porcentaje de C en la aleación queda determinado como 20 por ciento. Así, la composición de la aleación ternaria en el punto *x* es de 40 por ciento de A, 40 por ciento de B, y 20 por ciento de C. De hecho, sólo es necesario determinar dos porcentajes, puesto que el tercero puede obtenerse restando de 100 por ciento la suma de los otros dos.

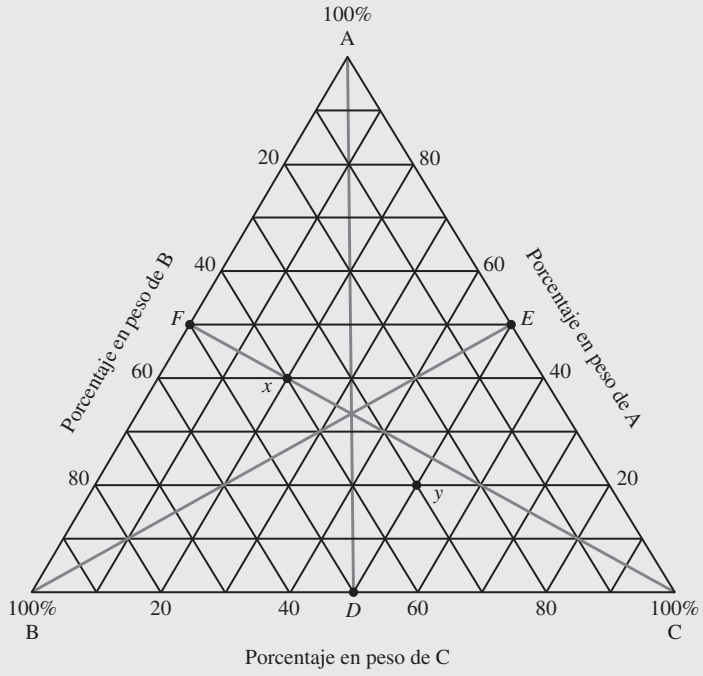


Figura EP8.9
Composición base de una aleación ABC en un diagrama de fases ternario.

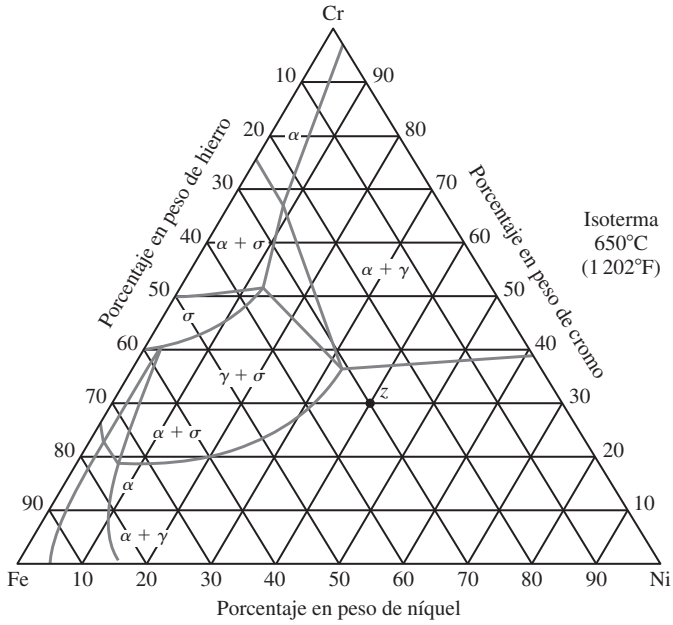


Figura 8.31
Diagrama de fases ternario de una sección isotérmica a 650°C (1 202°F) para el sistema hierro-cromo-níquel.
(Según "Metals Handbook", vol. 8, 8a. ed., American Society for Metals, 1973, p. 425.)

gura 8.31 se muestra una sección isotérmica a 650°C (1 202°F) para el sistema ternario hierro-cromo-níquel.

Los diagramas de fases ternarios son también importantes para el estudio de algunos materiales cerámicos. En la figura 11.32 se muestra un diagrama de fase ternario del importante sistema sílice-leucita-mulita.

8.13 RESUMEN

Los *diagramas de fases* son representaciones gráficas de las fases que están presentes en un sistema de aleación (o cerámico) a diversas temperaturas, presiones y composiciones. Los diagramas de fases se construyen empleando la información recopilada en las curvas de enfriamiento. Las curvas de enfriamiento son gráficos de tiempo y temperatura generados para diversas composiciones de aleaciones y brindan información sobre las temperaturas de transición de las fases. En este capítulo se ha hecho hincapié en los diagramas de fases binarios en equilibrio temperatura-composición. Estos diagramas indican qué fases están presentes a diferentes composiciones y temperaturas para condiciones de enfriamiento o calentamiento lentos que se acercan al equilibrio. En las regiones de dos fases de estos diagramas, la composición química de cada una de las dos fases se indica por la intersección de la isoterma con los límites de fase. La fracción en peso de cada fase en una región de dos fases puede determinarse usando la regla de la palanca a lo largo de una isoterma (línea de enlace a una temperatura particular).

En los *diagramas de fase isomorfa* binarios en equilibrio, los dos componentes son completamente solubles entre sí en estado sólido y, por tanto, sólo hay una única fase sólida. En los diagramas de fase binarios en equilibrio de aleaciones (o cerámica) se producen con frecuencia *reacciones invariantes* que involucran a tres fases en equilibrio. Las más comunes de esas reacciones son:

1. Reacción eutéctica: $L \rightarrow \alpha + \beta$
2. Reacción eutectoide: $\alpha \rightarrow \beta + \gamma$
3. Reacción peritéctica: $\alpha + L \rightarrow \beta$
4. Reacción peritectoide: $\alpha + \beta \rightarrow \gamma$
5. Reacción monotéctica: $L_1 \rightarrow \alpha + L_2$

En muchos diagramas de fase binarios en equilibrio se encuentran fase(s) y/o compuestos intermedios. Las fases intermedias tienen una variedad de composiciones, mientras que los compuestos intermedios tienen una única composición. Si los dos componentes son metales, el compuesto intermedio se denomina un intermetálico.

Durante la solidificación rápida de muchas aleaciones se crean gradientes composicionales y se producen estructuras *con gradiente de concentración.* Una estructura con gradiente de concentración puede suprimirse por homogeneización de la aleación fundida durante largo tiempo a altas temperaturas, justo por debajo de la temperatura de fusión de la fase que funde a menor temperatura. Si la aleación fundida se sobrecalienta ligeramente de tal modo que la fusión tiene lugar en los límites de grano, se produce una estructura *licuada*. Este tipo de estructura es indeseable porque la aleación pierde resistencia y puede fracturarse durante el trabajo subsiguiente.

8.14 DEFINICIONES

Sección 8.1

Equilibrio: se dice que un sistema está en equilibrio si no tienen lugar cambios macroscópicos con el tiempo.

Fase: una porción física homogénea y diferente de un sistema material.

Diagrama de fase en equilibrio: representación gráfica de las presiones, temperaturas y composiciones para las cuales varias fases son estables en el equilibrio. En la ciencia de materiales, los diagramas de fases más comunes describen a la temperatura *versus* la composición.

Sección 8.2

Sistema: una porción del universo que ha sido aislada de tal modo que sus propiedades pueden ser estudiadas.

Regla de las fases de Gibbs: establece que en el equilibrio el número de fases más los grados de libertad es igual al número de componentes más 2, $P + F = C + 2$. De forma abreviada, con la presión $1 \approx$ atm, $P + F = C + 1$.

Grados de libertad F: número de variables (temperatura, presión y composición) que se pueden variar *independientemente* sin cambiar la fase o fases del sistema.

Número de componentes de un diagrama de fases: número de elementos o compuestos que constituyen el sistema del diagrama de fases. Por ejemplo, el sistema Fe-Fe_3C es un sistema de dos componentes; el sistema Fe-Ni es también un sistema de dos componentes.

Sección 8.3

Curva de enfriamiento: gráficas de temperatura *versus* tiempo construidas durante la solidificación de un metal. Brindan información sobre los cambios de fase a medida que se disminuye la temperatura.

Confinamiento térmico: región de la curva de enfriamiento para un metal puro donde la temperatura no cambia con el tiempo (meseta), representa la temperatura de congelación.

Sección 8.4

Sistema isomorfo: un diagrama de fases en el cual sólo existe una única fase sólida, esto es, hay sólo una estructura en estado sólido.

Liquidus: temperatura a la cual el líquido empieza a solidificarse bajo condiciones de equilibrio.

Solidus: temperatura durante la solidificación de una aleación a la cual la última parte de la fase líquida se solidifica.

Sección 8.5

Regla de la palanca: los porcentajes en peso de las fases en cualquier región de un diagrama de fases binario se pueden calcular usando esta regla si prevalecen las condiciones de equilibrio.

Línea de enlace: una línea de trabajo horizontal y que opera a una temperatura determinada, entre dos fases límites (en un diagrama de fases binario) con el objeto de aplicar sobre ella la regla de la palanca. Se dibuja una línea vertical desde la intersección de la isoterma hasta la línea horizontal en el punto de la intersección de la isoterma con la aleación de interés con el objeto de utilizar la regla de la palanca.

Sección 8.6

Estructura con gradiente de concentración: un tipo de microestructura que ocurre durante la solidificación rápida o el enfriamiento fuera de equilibrio de un metal.

Homogeneización: un proceso de tratamiento térmico que se da a un metal para eliminar estructuras con gradiente de concentración indeseables.

Sección 8.7

Reacción eutéctica (en un diagrama de fases binario): una transformación de fases en la cual toda la fase líquida se transforma isotérmicamente por enfriamiento en dos fases sólidas.

Temperatura eutéctica: la temperatura a la cual tiene lugar la reacción eutéctica.

Composición eutéctica: la composición de la fase líquida que reacciona para formar dos nuevas fases sólidas a la temperatura eutéctica.

Punto eutéctico: el punto determinado por la composición y la temperatura eutécticos.

Reacciones invariantes: transformaciones de fase en equilibrio que suponen cero grados de libertad.

Solvus: un límite de fases por debajo de la fase límite de sólido proeutéctico más líquido isotérmico, y entre la solución sólida terminal y las regiones de dos fases en un diagrama de fase binario eutéctico.

Composición hipoeutéctica: aquella que se encuentra a la izquierda del punto eutéctico.

Composición hipereutéctica: aquella que se halla a la derecha del punto eutéctico.

Fase proeutéctica: fase que se forma a una temperatura por encima de la temperatura eutéctica.

Fase primaria: fase sólida que se forma a una temperatura superior a la de una reacción invariante y que está aún presente después de que se completa la reacción invariante.

Sección 8.8

Reacción peritéctica (en un diagrama de fases binario): una transformación de fases en la cual, por enfriamiento, una fase líquida se combina con una fase sólida para producir una nueva fase sólida.

Sección 8.9

Reacción monotéctica (en un diagrama de fases binario): una transformación de fases en la cual, por enfriamiento, una fase líquida se transforma en una fase sólida y una nueva fase líquida (de composición diferente a la primera fase líquida).

Sección 8.10

Reacciones invariantes: reacciones en las que las fases en reacción tienen temperatura y composición fijas. El grado de libertad, F_1, es cero en estos puntos de reacción.

Sección 8.11

Fase terminal: una solución sólida de un componente en otro para la que un límite del campo de fases es un componente puro.

Fase intermedia: fase cuyo intervalo de composición se encuentra entre los de las fases terminales.

8.15 PROBLEMAS

Las respuestas a los problemas marcados con un asterisco se encuentran al final del libro.

8.1 Defina *a*) una fase en un material y *b*) un diagrama de fases.

8.2 En el diagrama de fases de equilibrio presión-temperatura para el agua pura, ¿qué fases están en equilibrio para las siguientes condiciones?

a) A lo largo de la línea de solidificación.

b) A lo largo de la línea de vaporización.

c) En el punto triple.

8.3 ¿Cuántos puntos triples hay en el diagrama de fases de equilibrio presión-temperatura del hierro puro de la figura 8.2? ¿Qué fases están en equilibrio en cada uno de los puntos triples?

8.4 Escriba la ecuación de la regla de las fases de Gibbs y defina cada uno de los términos.

8.5 Consulte el diagrama de fases del equilibrio presión-temperatura para el agua pura (figura 8.1) y conteste a las siguientes preguntas:

a) ¿Cuántos grados de libertad hay en el punto triple?

b) ¿Cuántos grados de libertad existen a lo largo de la línea de solidificación?

8.6 ¿Qué es un sistema de aleación binaria isomorfa?

8.7 ¿Cuáles son las cuatro reglas de Hume-Rothery para la solubilidad sólida de un elemento en otro?

8.8 En el cuadro siguiente se da una lista de un número de elementos con su estructura cristalina y radio atómico. ¿Qué pares de elementos tendrían presumiblemente una solubilidad sólida ilimitada?

	Estructura cristalina	Radio atómico (nm)		Estructura cristalina	Radio atómico (nm)
Plata	FCC	0.144	Plomo	FCC	0.175
Paladio	FCC	0.137	Volframio	BCC	0.137
Cobre	FCC	0.128	Rodio	FCC	0.134
Oro	FCC	0.144	Platino	FCC	0.138
Níquel	FCC	0.125	Tántalo	BCC	0.143
Aluminio	FCC	0.143	Potasio	BCC	0.231
Sodio	BCC	0.185	Molibdeno	BCC	0.136

8.9 Describa la regla de la palanca para la suma del peso porcentual de cada fase en regiones de dos fases de un diagrama de fases binario. Use el diagrama de fases para que dos elementos sean completamente solubles entre sí.

8.10 Considere que una aleación tiene 70% en peso de Ni y 30% de Cu (véase la figura 8.5).

a) Efectúe un análisis de fases a 1 350°C suponiendo condiciones de equilibrio. En el análisis de fases incluya como preguntas las siguientes:

i) ¿Qué fases están presentes?

ii) ¿Cuál es la composición química de cada una?

iii) ¿Qué cantidades de cada fase están presentes?

b) Efectúe un análisis de fase similar a 1 500°C.

c) Esquematice la microestructura de una aleación a cada una de las temperaturas indicadas utilizando campos microscópicos circulares.

8.11 Describa cómo pueden determinarse experimentalmente las líneas de liquidus y de solidus en un diagrama de fases binario isomorfo.

8.12 Explique cómo se produce una estructura con gradiente de concentración en una aleación de 70% de Cu-30% Ni.

8.13 ¿Cómo se puede eliminar por tratamiento térmico una estructura con gradiente de concentración de una aleación de 70% de Cu-30% Ni?

8.14 Explique cuál es el significado del término *fusión localizada*. ¿Cómo se puede producir en una aleación una estructura de estas características y cómo se puede evitar?

8.15 Considere el diagrama de fases binario eutéctico cobre-plata de la figura 8.32. Efectúe el análisis de fases de una aleación de 88% en peso de plata y 12% en peso de cobre a las temperaturas *a*) 1 000°C, *b*) 800°C, *c*) 780°C + ΔT y *d*) 780°C − ΔT en el análisis de fases, incluya:

i) Las fases actuales

ii) La composición química de las fases

iii) Las Las cantidades de cada fase

iv) Esquematice la microestructura usando campos circulares de 2 cm de diámetro.

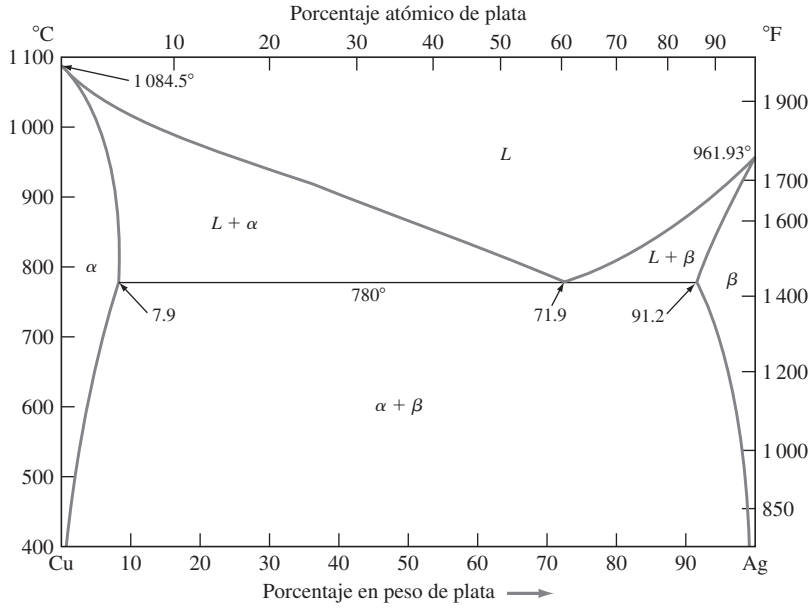


Figura 8.32
Diagrama de fases cobre-plata.
(Según "Metals Handbook", vol. 8, 8a. ed., American Society for Metals, 1973, p. 253.)

IceNine

***8.16** Si 500 g de una aleación de 40% en peso de Cu-60% de Ag se enfría lentamente desde 1 000°C hasta 780°C (véase la figura 8.32):

a) ¿Cuántos gramos de líquido y alfa proeutéctico se presentan a 850°C?

b) ¿Cuántos gramos de líquido y alfa proeutéctico se presentan a 780°C + ΔT?

c) ¿Cuántos gramos de alfa se presentan en la estructura eutéctica a 780°C − ΔT?

d) ¿Cuántos gramos de beta se presentan en la estructura eutéctica a 780°C − ΔT?

***8.17** Una aleación de plomo-estaño (Pb-Sn) consta de 60% en peso de beta proeutéctico y 40% de eutéctico 183°C − ΔT. Calcule la composición promedio de esta aleación (véase la figura 8.13).

8.18 Una aleación Pb-Sn (figura 8.13) contiene 40% en peso de β y 60% en peso de α a 50°C. ¿Cuál es la composición media de Pb y de Sn en esta aleación?

8.19 Una aleación de 30% en peso de Pb y 70% en peso de Sn se enfría lentamente desde 250°C hasta 27°C (véase la figura 8.13).

a) ¿Esta aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica?

b) ¿Cuál es la composición del primer sólido que se forma?

c) ¿Cuáles son las cantidades y composición de cada fase a 183°C + ΔT?

d) ¿Cuáles son las cantidades y composición de cada fase a 183°C − ΔT?

e) ¿Cuál es la cantidad que se presenta en cada fase a temperatura ambiente?

8.20 Considere el diagrama de fases binario peritéctico del iridio-osmio de la figura 8.33. Efectúe un análisis de fase de una aleación de 70% en peso de Ir-30% en peso de Os a las temperaturas *a*) 2 600°C, *b*) 2 665°C + ΔT y *c*) 2 665°C − ΔT. En el análisis de fases incluya:

i) Las fases presentes

ii) Las composiciones químicas de cada fase

iii) Las cantidades de cada fase

iv) Esquematice la microestructura utilizando campos circulares de 2 cm de diámetro.

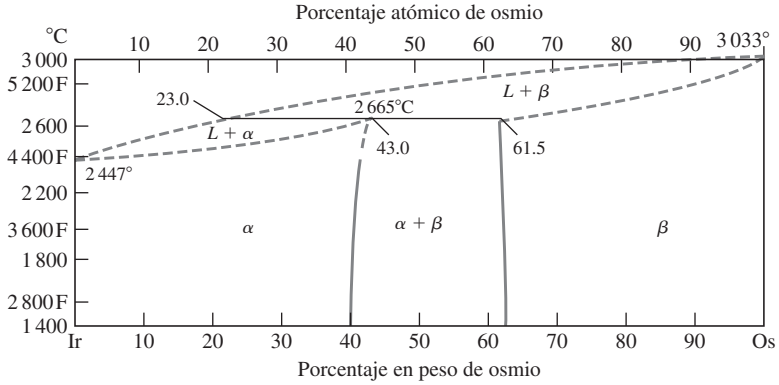


Figura 8.33
Diagrama de fases iridio-osmio.
(Según "Metals Handbook", vol. 8, 8a. ed., American Society for Metals, 1973, p. 332.)

8.21 Considere el diagrama de fases binario peritéctico del iridio-osmio de la figura 8.33. Efectúe un análisis de fases de una aleación de 40% en peso de Ir-60% en peso de Os a las temperaturas *a*) 2 600°C, *b*) 2 665°C + ΔT, *c*) 2 665°C − ΔT y *d*) 2 800°C. Incluya en el análisis de fases los cuatro incisos del problema anterior.

8.22 Describa el mecanismo que produce el fenómeno de *región circundante* en una aleación que se solidifica rápidamente a través de una reacción peritéctica.

8.23 ¿Puede ocurrir segregación y una región circundante en una aleación del tipo peritéctico que es solidificada rápidamente? Explique.

***8.24** Considere una aleación de hierro con 4.2% en peso de Ni (figura 8.18) que se enfría lentamente desde 1 550°C hasta 1 450°C. ¿Qué porcentaje en peso de la aleación se solidificará para la reacción peritéctica?

8.25 Considere una aleación de Fe-5.0% en peso de Ni (figura 8.18) que se enfría lentamente desde 1 550 hasta 1 450°C. ¿Qué porcentaje en peso de la aleación se solidificará por la reacción peritéctica?

***8.26** Determine el porcentaje en peso y la composición porcentual en peso de cada fase presente en una aleación de Fe y 4.2% en peso de Ni (figura 8.18) a 1 517°C + ΔT.

8.27 Determine la composición porcentual en peso de una aleación de Fe-Ni (figura 8.18) que formará una estructura de 40% en peso de δ y 60% en peso de γ, justo por debajo de la temperatura peritéctica.

8.28 ¿Qué es una reacción monotéctica invariante? ¿Cómo es la reacción monotéctica en el sistema cobre-plomo de importancia industrial?

***8.29** En el sistema cobre-plomo (Cu-Pb) (figura 8.25) de una aleación de Cu-10% en peso de Pb, determine las cantidades y composiciones de las fases presentes a *a*) 100°C, *b*) 955°C + ΔT, *c*) 955°C − ΔT y *d*) 200°C.

8.30 Para una aleación de Cu-70% en peso de Pb (figura 8.25), determine las cantidades y composiciones en porcentaje en peso de las fases presentes a *a*) 955°C + ΔT, *b*) 955°C − ΔT y *c*) 200°C.

***8.31** ¿Cuál es la composición media (en porcentaje en peso) de una aleación Pb, que contiene 30% en peso de L_1 y 70% en peso de 955°C + ΔT?

8.32 Escriba las ecuaciones de las siguientes reacciones invariantes: eutéctica, eutectoide, peritéctica y peritectoide. ¿Cuántos grados de libertad existen en los puntos de la reacción invariante en los diagramas de fases binarios?

8.33 ¿Cómo es que las reacciones eutécticas y eutectoides son similares? ¿Cuál es el significado del sufijo-*oid*?

8.34 Distinga entre *a*) una fase terminal y *b*) una fase intermedia.

8.35 Distinga entre *a*) una fase intermedia y *b*) un compuesto intermedio.

8.36 ¿Cuál es la diferencia entre un compuesto de fusión congruente y el otro de fusión incongruente?

IceNine

8.37 Considere el diagrama de fases Cu-Zn en la figura 8.27.

a) ¿Cuál es la máxima solubilidad sólida en porcentaje en peso de Zn en Cu en la solución sólida terminal α?

b) Identifique las etapas intermedias en el diagrama de fases del Cu-Zn.

c) Identifique las reacciones invariantes de tres fases en el diagrama de Cu-Zn.

i) Determine las coordenadas de composición y temperatura de las reacciones invariantes.

ii) Escriba las ecuaciones de las reacciones invariantes.

iii) Nombre las reacciones invariantes.

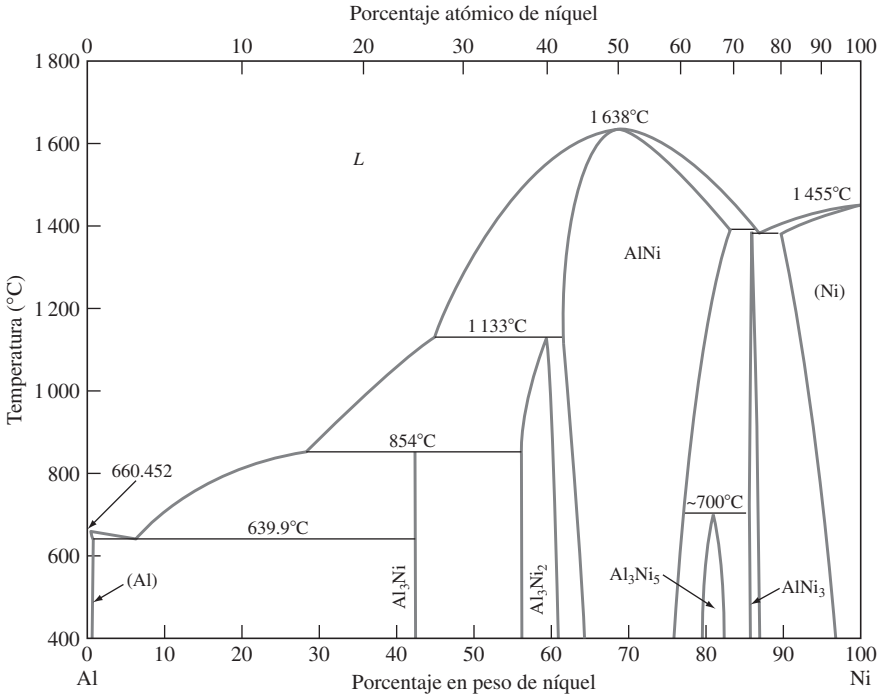


Figura 8.34
Diagrama de fases aluminio-níquel.
(Según BinaryPhase Diagrams, ASM Int., 1986, p. 142.)

8.38 Considere el diagrama de fases aluminio-níquel (Al-Ni) de la figura 8.34. Para este diagrama de fase:

a) Determine las coordenadas de la composición y temperatura de las reacciones invariantes.

b) Escriba las ecuaciones para las reacciones invariantes de tres fases y nómbrelas.

c) Señale las regiones de dos fases en el diagrama de fase.

8.39 Considere el diagrama de fases níquel-vanadio (Ni-V) en la figura 8.35. Para este diagrama de fases repita las cuestiones *a*), *b*) y *c*) del problema 8.38.

8.40 Considere el diagrama de fases titanio-aluminio (Ti-Al) de la figura 8.35. Para este diagrama de fases repita las cuestiones *a*), *b*) y *c*) del problema 8.38.

8.41 ¿Cuál es la composición del punto *y* en la figura EP8.9?

8.16 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. Diseñe una aleación Cu-Ni que esté completamente fundida a 1 300°C y sea completamente sólida a 1 200°C (utilice la figura 8.5).

2. Diseñe una aleación Cu-Ni que sea completamente sólida a 1 200°C (utilice la figura 8.5).

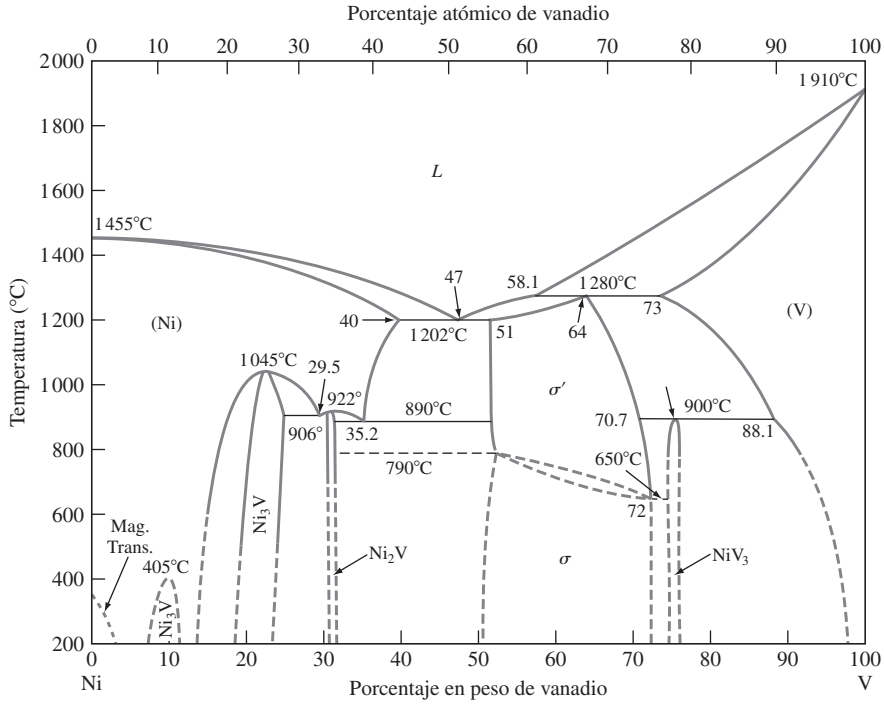


Figura 8.35
Diagrama de fases níquel-vanadio.
(Según Binary Phase Diagrams, ASM Int., 1986, p. 1773.)

IceNine

3. Diseñe una aleación de Pb-Sn que exista en un estado completamente líquido a la temperatura más baja posible (use la figura 8.13).

4. *a*) Diseñe una aleación de Pb-Sn que tenga una fracción de fase líquida y sólida 50-50 a 184°C. *b*) ¿Cuántos gramos de cada componente deberá utilizar para obtener esa aleación? (use la figura 8.13).

5. Dado que el Pb y el Sn tienen resistencias similares a la tensión diseñe una aleación Pb-Sn que una vez colada sea la aleación más resistente (use la figura 8.13). Explique sus razones para la elección.

6. Con base en el diagrama de fase Al-Ni dado en la figura 8.34, ¿cuántos gramos de Ni deberían alearse con 100 gramos de Al para sintetizar una aleación de temperatura de liquidus de 640°C, aproximadamente?

7. Una aleación de Al con 10% en peso de Ni está completamente líquida a 800°C. ¿Cuántos gramos de Ni se pueden adicionar a esta aleación a 800°C sin originar una fase sólida?

8. Con base en el diagrama de fases de Al_2O_3-SiO_2 de la figura 8.28, dibuje el porcentaje y peso de las fases presentes para Al_2O_3-55 con 55% en peso de SiO_2 entre el rango de temperatura ambiente de 2 000 a 1 500°C.

9. Se forma un compuesto intermetálico durante el enfriamiento lento de Ti-63 % en peso de Al. *a*) Determine la fórmula química de este compuesto. *b*) Compare la temperatura de fusión de este compuesto con la del Ti y Al.

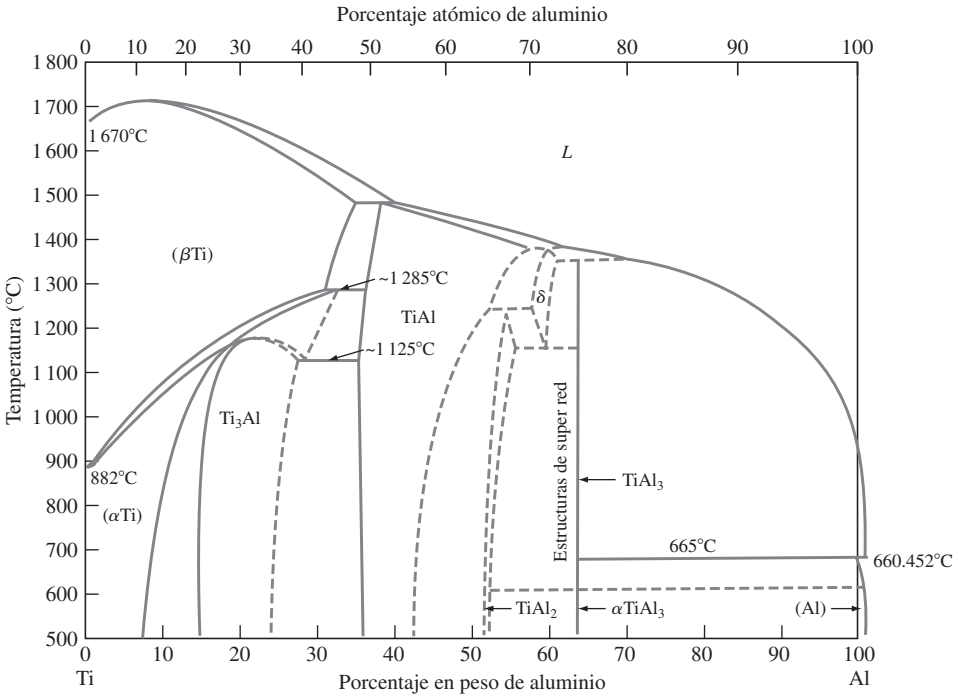


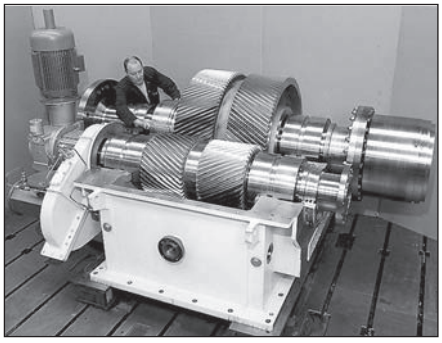
Figura 8.36
Diagrama de fases titanio-aluminio.
(Según Bynary Phase Diagrams, ASM Int., 1986, p. 1773.)

10. Con base en el diagrama de fases de Cu-Ag de la figura 8.32, dibuje la curva de enfriamiento aproximado para las siguientes aleaciones con explicaciones y temperaturas apropiadas.

a) Cu puro, *b*) Cu-7.9% en peso de Ag, *c*) Cu-10% en peso de Ag, *d*) Cu-40% en peso de Ag, *e*) Cu-71.9% en peso de Ag y *f*) Cu-95% en peso de Ag.

CAPÍTULO 9

Aleaciones para ingeniería



(© Textron Power Transmission)

Gran variedad de aleaciones metálicas, como aceros al carbono simple, aceros de aleación, aceros inoxidables, hierro fundido y aleaciones de cobre, se usan para fabricar diversos tipos de engranes. Por ejemplo, los aceros al cromo se usan en engranes de transmisión para automóviles, los aceros al cromo-molibdeno se usan en engranes de turbinas de gas para aviones, los aceros al níquel-molibdeno se usan en equipo de excavación o movimiento de tierra, y algunas aleaciones de cobre se usan en la fabricación de engranajes para niveles de carga bajos. La elección del metal para engranes y su manufactura dependen de las dimensiones, los esfuerzos, las necesidades de potencia y el entorno en el que vayan a funcionar. Las fotos que aparecen al inicio de este capítulo muestran engranes de diversos tamaños que se utilizan en distintas industrias.[1] ■

[1] http://www.textronpt.com/cgi-bin/products.cgi?prod=highspeed&group=spcl

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Describir la fabricación del acero y el procesamiento de componentes de ese material. Distinguir entre acero al carbono simple, el acero aleado, hierro fundido y acero inoxidable.
2. Reconstruir el diagrama de fases del hierro-carbono e indicar todas las fases, reacciones y microestructuras clave.
3. Describir qué son la perlita y la martensita, cómo se producen y qué diferencias muestran en sus propiedades mecánicas.
4. Definir las transformaciones que se dan en el enfriamiento isotérmico y en el continuo.
5. Describir los procesos de recocido, normalización, temple instantáneo, revenido, martemperizado y austemperizado.
6. Describir la clasificación de aceros al carbono simple y aceros de aleación, y explicar el efecto de diversos elementos de aleación en las propiedades del acero.
7. Describir la clasificación, tratamiento térmico, microestructura y propiedades generales de las aleaciones de aluminio, aleaciones de cobre, aceros inoxidables y hierros fundidos.
8. Explicar la importancia y las aplicaciones de las aleaciones intermetálicas, las que tienen memoria de forma y las amorfas.
9. Describir las ventajas y desventajas de las aleaciones que se usan en aplicaciones biomédicas.

Los metales y las aleaciones tienen muchas propiedades útiles en ingeniería, por lo cual sus aplicaciones en diseños de este campo están muy generalizadas. El hierro y sus aleaciones (en primer lugar el acero) representan casi 90 por ciento de la producción mundial de metales, sobre todo por su satisfactoria combinación de resistencia, tenacidad y ductilidad a costo relativamente bajo. Cada metal tiene propiedades especiales para los diseños de ingeniería y se usa después de realizar un análisis comparativo de costos con otros metales y materiales (véase la tabla 9.1).

Las aleaciones a base de hierro se llaman *aleaciones ferrosas* y las que se basan en otros metales se llaman *aleaciones no ferrosas*. En este capítulo se analizan algu-

Tabla 9.1 Precios aproximados ($/lb) de algunos metales en mayo de 2001*

Acero†	0.27	Níquel	2.74
Aluminio	0.67	Estaño	2.30
Cobre	0.76	Titanio‡	3.85
Magnesio	3.29	Oro	3 108.00
Zinc	0.45	Plata	52.00
Plomo	0.22		

*Los precios de los metales cambian.
†Lámina de acero al carbono simple laminada en caliente.
‡Titanio esponjoso. Precios en grandes volúmenes.

nos aspectos del procesamiento, estructura y propiedades de varias aleaciones ferrosas y no ferrosas importantes. Las dos últimas secciones de este capítulo están dedicadas a las aleaciones avanzadas y sus aplicaciones en diversos campos, entre ellos el biomédico.

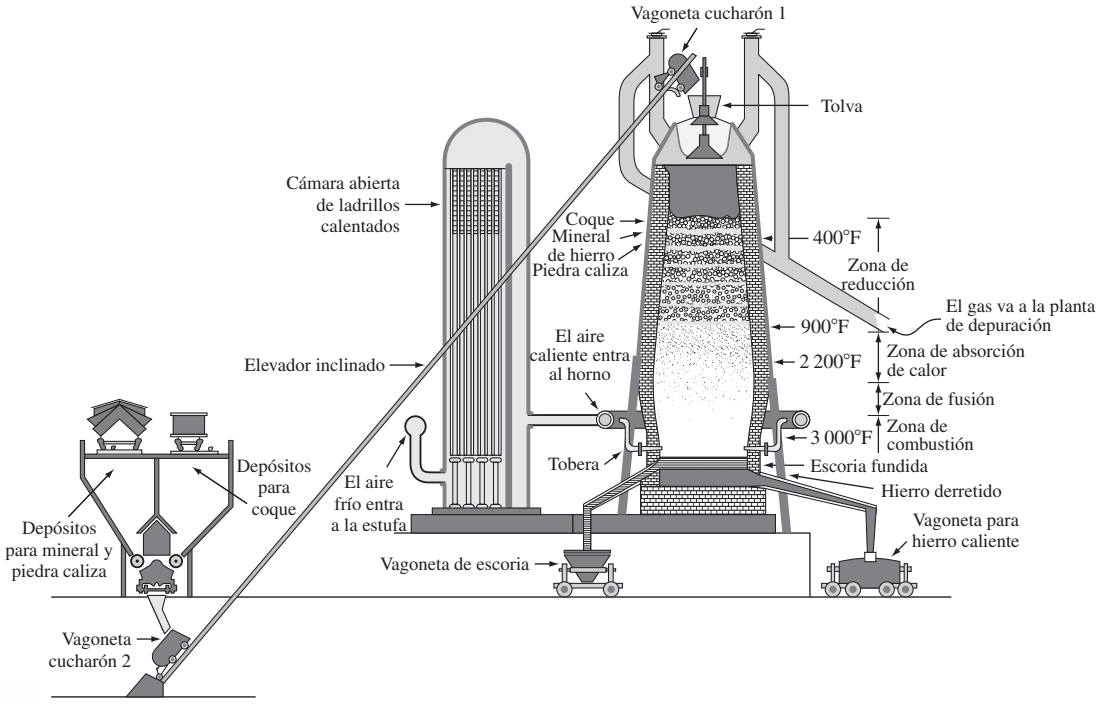
9.1 PRODUCCIÓN DE HIERRO Y ACERO

9.1.1 Producción de arrabio en un alto horno

La mayor parte del hierro se extrae de mineral de hierro en altos hornos muy grandes (figura 9.1). En el alto horno, el coque (carbono) actúa como agente reductor para reducir óxidos de hierro (principalmente Fe_2O_3) para producir arrabio en bruto, el cual contiene casi 4 por ciento de carbono además de otras impurezas, de acuerdo con la siguiente reacción típica

$$Fe_2O_3 + 3CO \longrightarrow 2Fe + 3CO_2$$

El arrabio del alto horno se transfiere usualmente en estado líquido a un horno para fabricar acero.



Animación

Figura 9.1
Corte transversal de la operación general de un alto horno moderno.
(Según A. G. Guy, "Elements of Physical Metallurgy", 2a. ed., © 1959, Addison-Wesley, figuras 2-5, pág. 21.)

9.1.2 Fabricación de acero y procesamiento de formas importantes de productos de ese material

Los aceros al carbono simples son, en esencia, aleaciones de hierro y carbono que contienen hasta 1.2 por ciento de carbono aproximadamente. Sin embargo, la mayoría de los aceros contienen menos de 0.5 por ciento de carbono. La mayoría de los aceros se fabrican mediante la oxidación del carbono y otras impurezas del arrabio hasta que el contenido de carbono en el hierro se reduce al nivel necesario.

El procedimiento más común para convertir el arrabio en acero es el proceso básico de oxígeno. En dicho proceso el arrabio y hasta 30 por ciento de chatarra de acero se introducen a un convertidor con revestimiento refractario, en forma de barril, en el cual se inserta una lanza de oxígeno (figura 9.2). El oxígeno puro proveniente de la lanza reacciona con el baño líquido para formar óxido de hierro. En seguida, el carbono del acero reacciona con el óxido de hierro y forma monóxido de carbono:

$$FeO + C \longrightarrow Fe + CO$$

Inmediatamente antes que comience la reacción del oxígeno se agregan cantidades controladas de fundentes (principalmente cal) que forman escoria. En este proceso, el contenido de carbono del acero se puede reducir de manera rápida en casi 22 minutos, al tiempo que se reduce la concentración de impurezas como azufre y fósforo (figura 9.3).

El acero derretido que viene del convertidor se vierte en moldes estacionarios o se vacía continuamente en largas planchas de las cuales se cortan periódicamente grandes secciones. Actualmente, casi 96 por ciento del acero se vierte de manera continua y casi 4 000 lingotes se funden todavía de manera individual. Sin embargo, casi la mitad del acero en bruto se produce mediante el reciclaje de acero viejo, como la chatarra de automóviles y antiguos aparatos electrodomésticos.[2]

Después de ser fundidos, los lingotes se calientan en un horno de termodifusión (figura 9.4) y se laminan en caliente para formar planchas y palanquillas *billet* o

[2] Tabla 23, págs. 73-75 del *Annual Statistical Report of the AI&SI*.

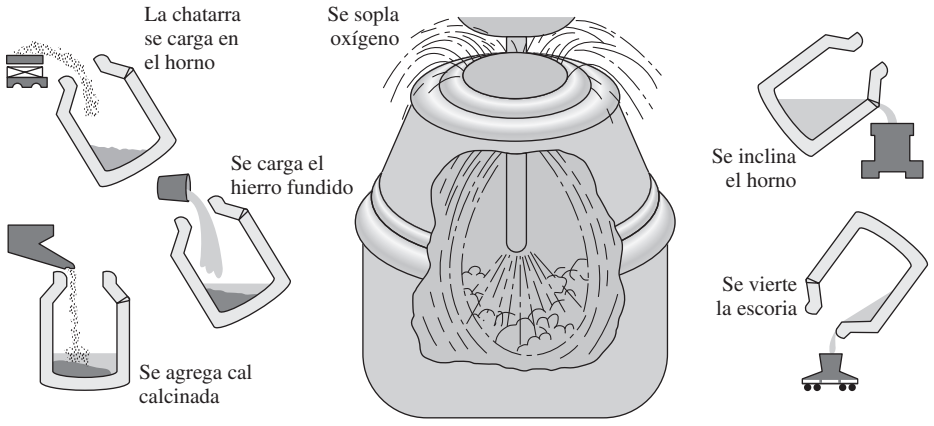


Figura 9.2
Fabricación de acero en un horno básico de oxígeno.
(Cortesía de Inland Steel.)

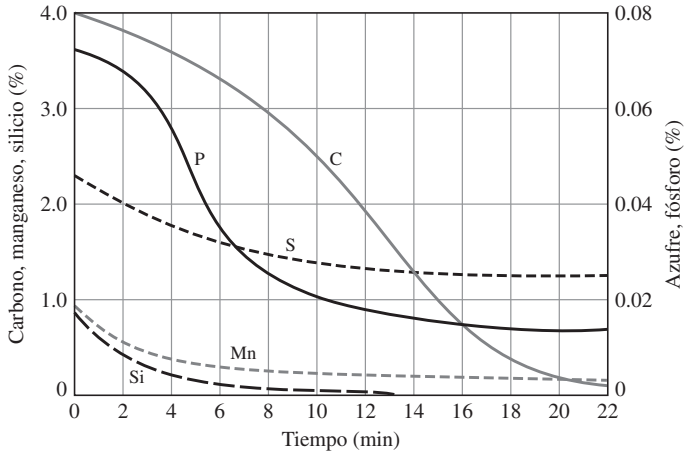


Figura 9.3
Representación esquemática del proceso de refinación en un recipiente forrado básico, soplado por arriba.
[Según H. E. McGannon (ed.), "The Making, Shaping, and Treating of Steel", 9a. ed., United States Steel Corp., 1971, pág. 494.]

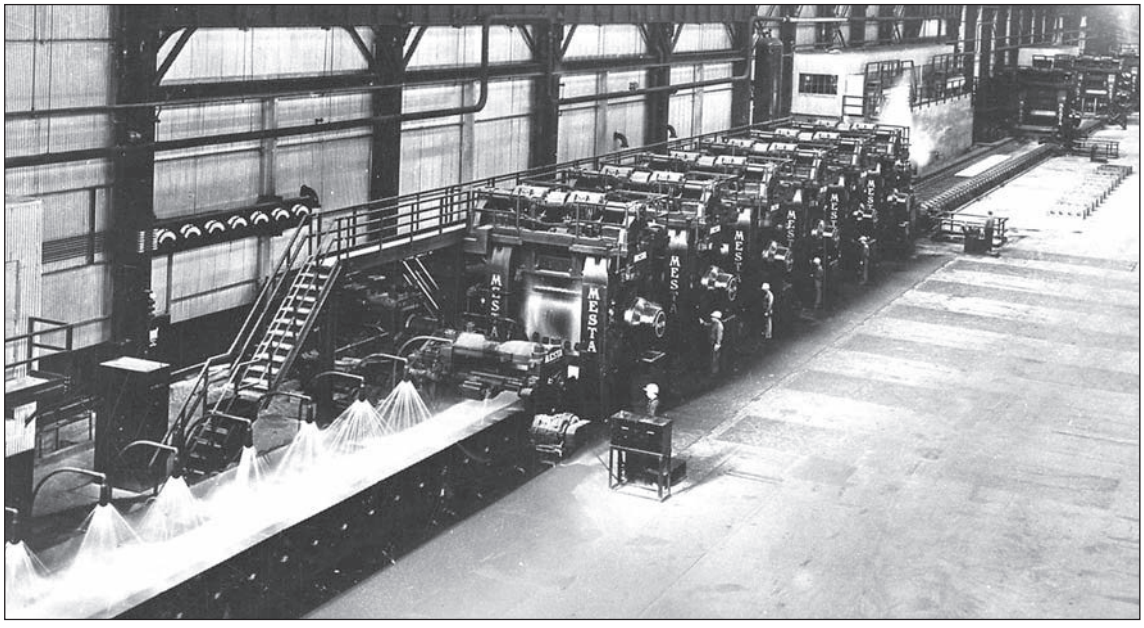


Figura 9.4
Laminado en caliente de una tira de acero. Esta fotografía muestra, al fondo, los rodillos de laminado en caliente del tren de desbaste y, frente a ellos, seis rodillos del tren de acabado por laminado en caliente. Una tira de acero sale del último rodillo de acabado y se templa rápidamente con agua.
(Cortesía de United States Steel Corporation.)

bloom. Después las planchas se laminan en caliente y en frío para formar láminas y placas de acero (véanse figuras 9.4 y 6.4 a 6.8). Las palanquillas *billet* se laminan en caliente y en frío para formar barras, varillas y alambre, mientras que las palanquillas *bloom* se laminan en caliente y en frío para crear perfiles como vigas en doble T y rieles. La figura 9.5 es un diagrama de flujo que resume los principales pasos del proceso para convertir las materias primas en importantes productos de acero.

9.2 EL SISTEMA HIERRO-CARBONO

Las aleaciones de hierro y carbono que contienen desde una cantidad muy pequeña de carbono (casi 0.03 por ciento) hasta 1.2 por ciento de carbono casi, de 0.25 a 1.00 por ciento de manganeso y cantidades menores de otros elementos[3] reciben el nombre de *aceros al carbono simples*. Sin embargo, para los propósitos de esta sección del libro, los aceros al carbono simples se consideran esencialmente como aleaciones binarias de hierro y carbono. En secciones ulteriores se comentan los efectos de otros elementos en el acero.

9.2.1 Diagrama de fases hierro-hierro-carburo

Ice Nine

Las fases presentes en las aleaciones de hierro y carbono enfriadas muy lentamente a diversas temperaturas y con diferentes composiciones de hierro hasta llegar a 6.67 por ciento de carbono se muestran en el diagrama de fases Fe-Fe_3C de la figura 9.6. Este diagrama de fases no es un verdadero diagrama de equilibrio porque el compuesto carburo de hierro (Fe_3C) que se forma no está en una fase de equilibrio real. En ciertas condiciones, el Fe_3C, que se llama **cementita**, se puede descomponer en las fases de hierro y carbono (grafito) que son más estables. Sin embargo, el Fe_3C es muy estable en la mayoría de las condiciones prácticas y, por lo tanto, se considerará como una fase de equilibrio.

9.2.2 Fases sólidas en el diagrama de fases Fe-Fe_3C

El diagrama Fe-Fe_3C contiene las siguientes fases sólidas: ferrita α, austenita (γ), cementita (Fe_3C) y ferrita δ.

Ferrita (α). Esta fase es una solución sólida intersticial de carbono en una estructura cristalina BCC. Como se indica en el diagrama de fases Fe-Fe_3C, el carbono es sólo ligeramente soluble en ferrita α y alcanza una solubilidad de sólidos máxima de 0.02 por ciento a 723°C. La solubilidad del carbono en ferrita α disminuye a 0.005 por ciento a 0°C.

Austenita (γ). La solución sólida intersticial del carbono en hierro γ se conoce con el nombre de *austenita.* La austenita tiene una estructura cristalina ccc y una solubilidad sólida mucho más alta para el carbono que la ferrita α. La solubilidad sólida del carbono en la austenita alcanza un máximo de 2.08 por ciento a 1 148°C y disminuye a 0.8 por ciento a 723°C (figura 9.6).

Cementita (Fe_3C). El compuesto intermetálico Fe_3C se llama *cementita.* La cementita tiene límites de solubilidad insignificantes y una composición de 6.67% C y 93.3% Fe. La cementita es un compuesto duro y frágil.

Ferrita δ. La solución sólida intersticial de carbono en hierro δ se llama *ferrita* δ. Tiene una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC) igual que la ferrita δ, pero con una constante de red más alta. La solubilidad sólida máxima del carbono en la ferrita δ es de 0.09 por ciento a 1 465°C.

[3] Los aceros al carbono simples contienen también impurezas de silicio, fósforo y azufre, y de otros elementos.

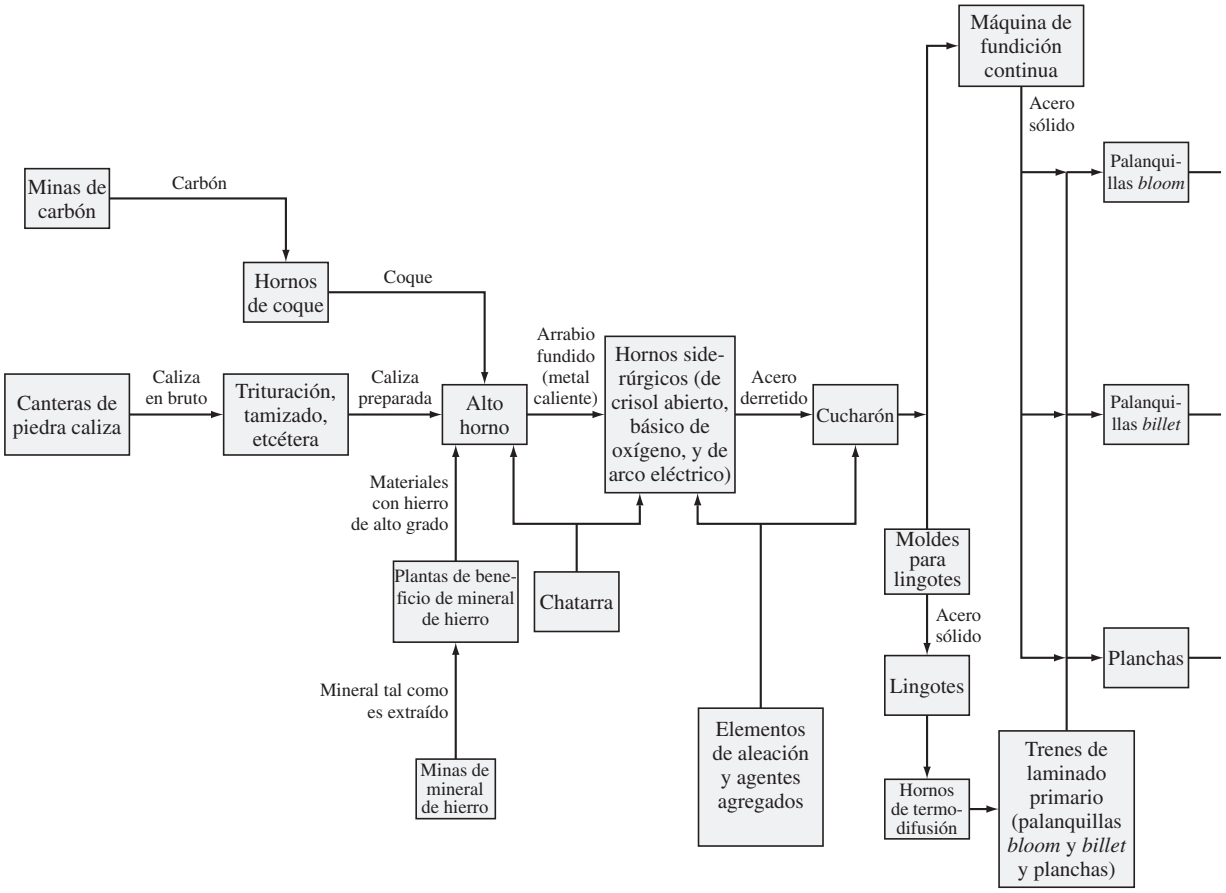


Figura 9.5
Diagrama de flujo que muestra los principales pasos del proceso necesario para convertir materias primas en las principales formas del producto, sin contar los productos con recubrimiento.
[H. E. McGannon (ed.), "The Making, Shaping, and Treating of Steel", 9a. ed., United States Steel Corp., 1971, pág. 2.]

9.2.3 Reacciones invariantes en el diagrama de fases Fe-Fe_3C

Reacción peritéctica En el punto de reacción peritéctica, el líquido con 0.53% C se combina con ferrita δ de 0.09% C para formar austenita γ de 0.17% C. Esta reacción, que ocurre a 1 495°C, puede escribirse así

$$\text{Líquido } (0.53\%\ \text{C}) + \delta\ (0.09\%\ \text{C}) \xrightarrow{1\,495^{\circ}\text{C}} \gamma\ (0.17\%\ \text{C})$$

La ferrita δ es una fase de alta temperatura y, por lo tanto, no se encuentra en los aceros al carbono simples a temperaturas más bajas.

Reacción eutéctica En el punto de reacción eutéctica, el líquido de 4.3 por ciento forma austenita γ de 2.08% C y el compuesto intermetálico Fe_3C (cemen-

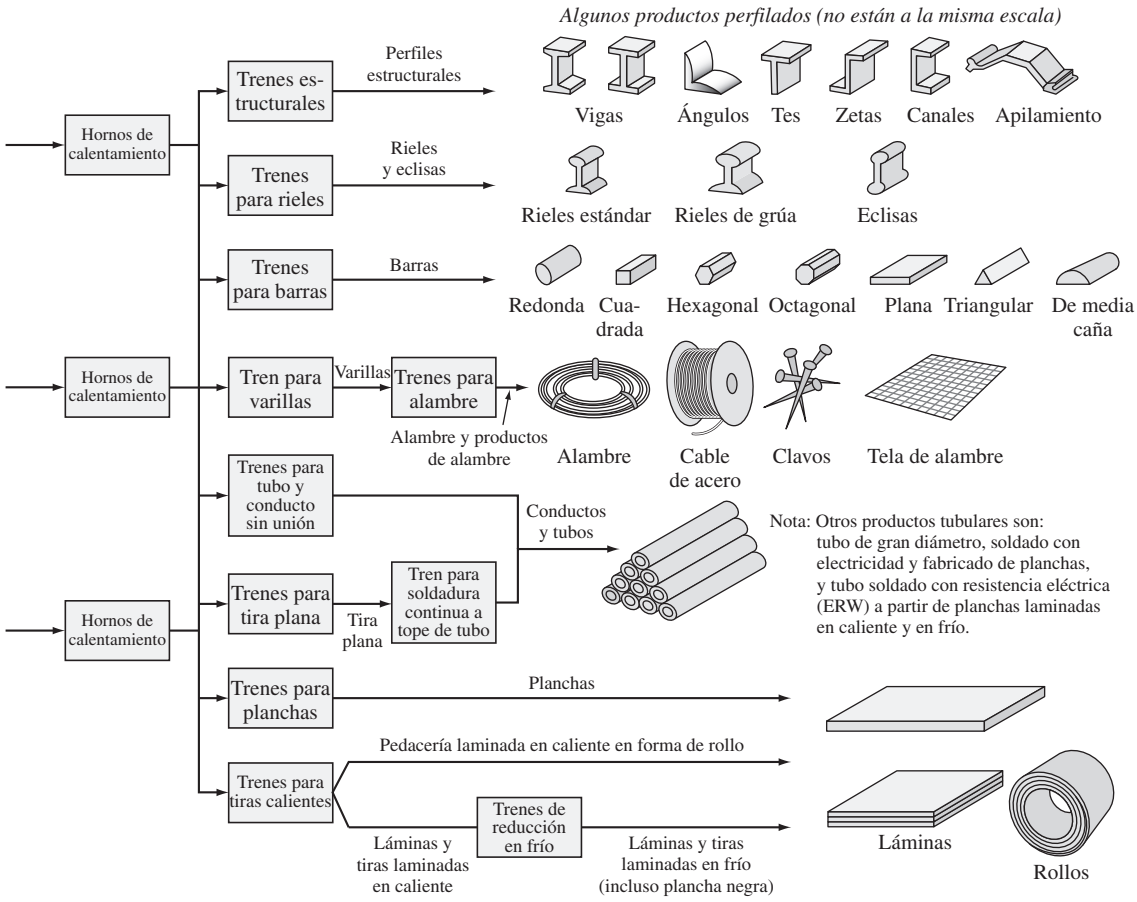


Figura 9.5 (*continuación*)

tita), que contiene 6.67% C. Esta reacción, que ocurre a 1 148°C, puede escribirse así

$$\text{Líquido}\ (4.3\%\ \text{C}) \xrightarrow{1148^\circ\text{C}} \text{austenita}\ \gamma\ (2.08\%\ \text{C}) + \text{Fe}_3\text{C}\ (6.67\%\ \text{C})$$

Esta reacción no se produce en los aceros al carbón simples porque su contenido de carbono es demasiado bajo.

Reacción eutectoide En el punto de reacción eutectoide, la austenita sólida de 0.8% C produce ferrita α con 0.02% C y Fe_3C (cementita) que contiene 6.67% C. Esta reacción, que ocurre a 723°C, puede escribirse así

$$\text{austenita}\ \gamma\ (0.8\%\ \text{C}) \xrightarrow{723^\circ\text{C}} \text{ferrita}\ \alpha\ (0.02\%\ \text{C}) + \text{Fe}_3\text{C}\ (6.67\%\ \text{C})$$

Esta reacción eutectoide, que se produce íntegramente en estado sólido, es importante para algunos tratamientos térmicos de aceros al carbono simples.

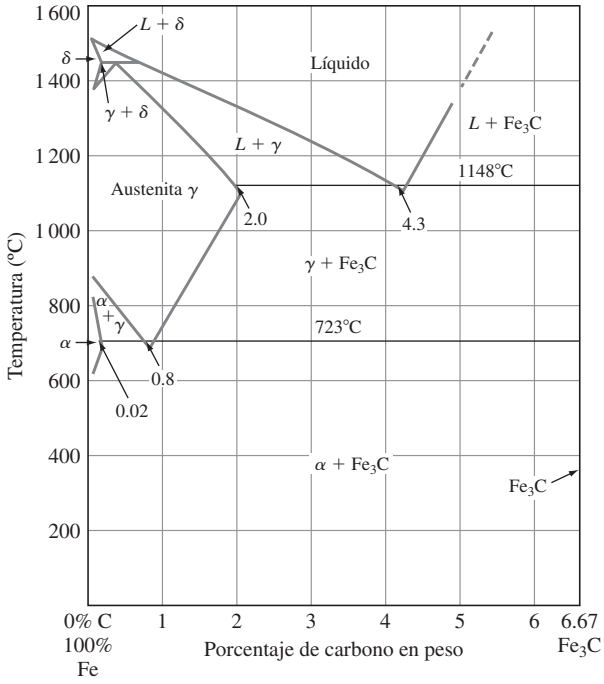


Figura 9.6
Diagrama de fases del carburo hierro-hierro.

Ice Nine

Un acero al carbono simple que contiene 0.8% C se conoce como **acero eutectoide** porque cuando la austenita de esta composición es enfriada lentamente a menor temperatura de la eutectoide se forma una estructura totalmente eutectoide de ferrita α y Fe_3C. Cuando un acero al carbono simple contiene menos de 0.8% C se llama **acero hipoeutectoide**, y si el acero contiene más de 0.8% C se le llama **acero hipereutectoide**.

9.2.4 Enfriamiento lento de aceros al carbono simples

Aceros eutectoides al carbono simples Si una muestra de 0.8 por ciento de acero (eutectoide) al carbono simple se calienta a unos 750°C y se mantiene así el tiempo suficiente, su estructura se convertirá en austenita homogénea. Este proceso se conoce como **austenitizado**. Si después este acero eutectoide se enfría muy lentamente hasta que apenas rebase la temperatura eutectoide, su estructura continuará siendo austenítica, como se indica en el punto *a* de la figura 9.7. Si se sigue enfriando hasta la temperatura eutectoide o apenas por abajo de ella, toda la estructura de austenita se transformará en una estructura laminar de placas alternadas de ferrita α y cementita (Fe_3C). Apenas por abajo de la temperatura eutectoide, en el punto *b* de la figura 9.7, la estructura laminar aparecerá como se muestra en la figura 9.8. Esta estructura eutectoide se llama **perlita** por su semejanza con la madreperla. Debido a que la solubilidad del carbón en la ferrita α y el Fe_3C varía muy poco desde 723°C hasta la temperatura ambiente, la estructura de la perlita se mantiene esencialmente invariable en este intervalo de temperaturas.

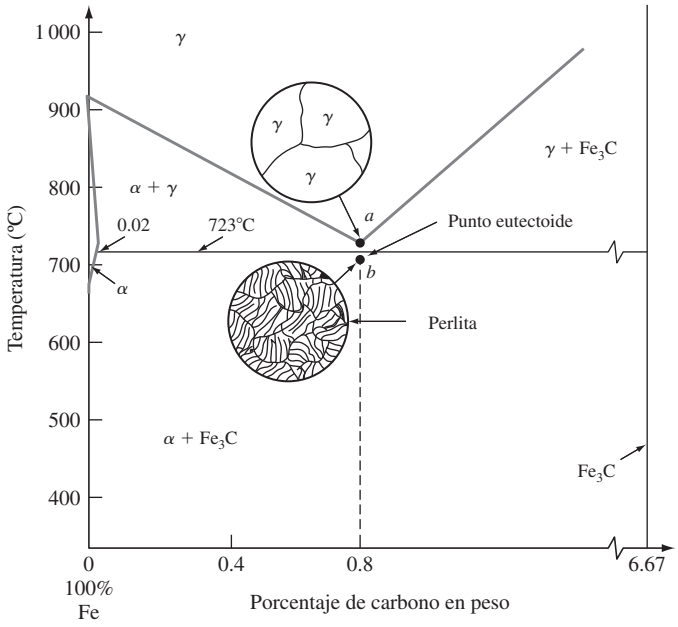


Figura 9.7
Transformación de un acero eutectoide (0.8% C) bajo enfriamiento lento.
(Según W. F. Smith, "Structure and Properties of Engineering Alloys", 2a. ed., McGraw-Hill, 1981, pág. 8.)

Ice Nine

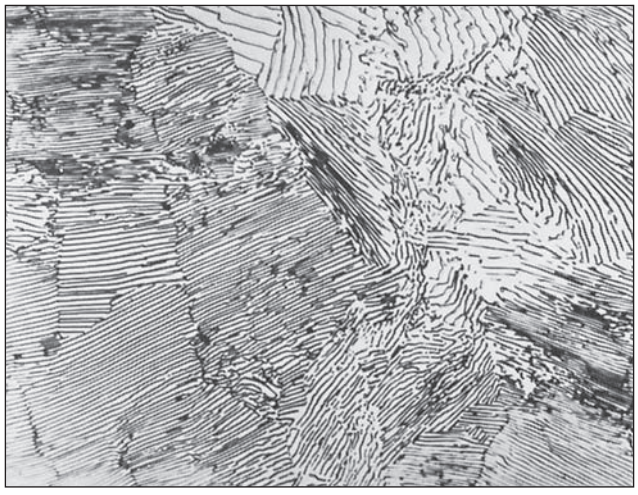


Figura 9.8
Microestructura de un acero eutectoide enfriado lentamente. La microestructura está formada por perlita eutectoide laminar. La fase que aparece oscura en el grabado es cementita y la fase blanca es ferrita. (Grabado: picral; amplificación 650×.)
(United States Steel Corporation, tal como se presenta en "Metals Handbook", vol. 8, 8a. ed., American Society for Metals, 1973, pág. 188.)

Laboratorio virtual

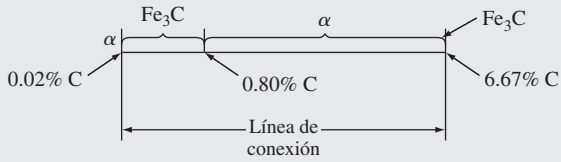
PROBLEMA DE EJEMPLO 9.1

Un acero al carbono simple eutectoide con 0.80% C se enfría lentamente desde 750°C hasta una temperatura apenas por abajo de 723°C. Suponiendo que la austenita se transforme totalmente en ferrita α y cementita:

a) Calcule el porcentaje en peso de ferrita eutectoide que se forma.
b) Calcule el porcentaje en peso de cementita eutectoide que se forma.

■ Solución

Con referencia a la figura 9.6, dibujamos primero una línea de conexión apenas por abajo de 723°C desde el límite de la fase de ferrita α hasta el límite de la fase de Fe_3C y se indica la composición de 0.80% C sobre la línea como se muestra en la siguiente figura:



a) La fracción en peso de ferrita se calcula a partir de la relación entre el segmento de la línea de conexión a la derecha de 0.80% C en toda la longitud de dicha línea. Al multiplicar por 100% se obtiene el porcentaje en peso de ferrita:

$$\%\text{ en peso de ferrita} = \frac{6.67 - 0.80}{6.67 - 0.02} \times 100\% = \frac{5.87}{6.65} \times 100\% = 88.3\% \blacktriangleleft$$

b) El porcentaje en peso de cementita se calcula en forma similar, utilizando la relación entre el segmento de la línea de conexión a la izquierda de 0.80% C y toda la longitud de esa línea, y multiplicando después por 100 por ciento:

$$\%\text{ en peso de cementita} = \frac{0.80 - 0.02}{6.67 - 0.02} \times 100\% = \frac{0.78}{6.65} \times 100\% = 11.7\% \blacktriangleleft$$

Aceros al carbono simples hipoeutectoides Si una muestra de acero al carbono simple con 0.4% C (acero tipo eutectoide) se calienta a casi 900°C (punto *a* en la figura 9.9) durante suficiente tiempo, su estructura llegará a ser de austenita homogénea. Después, si ese acero se enfría lentamente hasta la temperatura *b* de la figura 9.9 (casi 775°C), la **ferrita proeutectoide**[4] sufre una nucleación y crece especialmente en los límites del grano austenítico. Si esta aleación se enfría lentamente desde la temperatura *b* hasta *c* de la figura 9.9, la cantidad de ferrita proeutectoide formada seguirá incrementándose hasta que casi 50 por ciento de la austenita se haya transformado. Mientras el acero se enfría de *b* a *c*, el contenido de carbono de la austenita restante se incrementa de 0.4 a 0.8 por ciento. A 723°C, si persisten las condiciones de enfriamiento lento, la austenita restante se transformará isotérmicamente en perlita median-

[4] El prefijo *pro-* significa "antes", por lo cual el término *ferrita proeutectoide* se usa para distinguir a este constituyente, que se forma antes, de la ferrita eutectoide que se forma mediante la reacción eutectoide en un momento ulterior durante el enfriamiento.

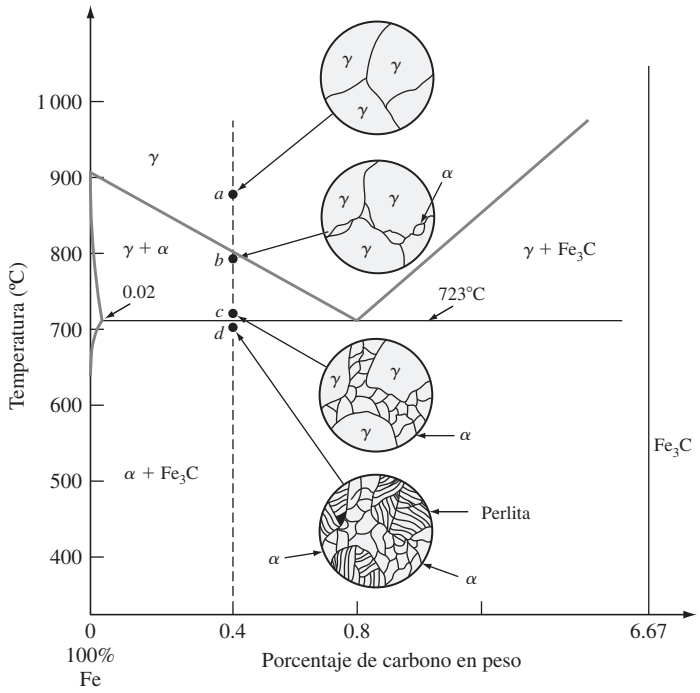


Figura 9.9
Transformación de un acero al carbono simple hipoeutectoide con 0.4% C mediante enfriamiento lento.
(Según W. F. Smith, "Structure and Properties of Engineering Alloys", 2a. ed., McGraw-Hill, 1993, pág. 10.)

te la reacción eutectoide austenita → ferrita + cementita. La ferrita α contenida en la perlita se llama **ferrita eutectoide** para distinguirla de la ferrita proeutectoide que se forma primero arriba de 723°C. La figura 9.10 es una micrografía óptica de la estructura de un acero hipoeutectoide de 0.35% C que se austenitizó y luego se enfrió lentamente hasta la temperatura ambiente.

PROBLEMA DE EJEMPLO 9.2

a) Un acero al carbono simple hipoeutectoide con 0.40% C es enfriado lentamente desde 940°C hasta una temperatura apenas por arriba de 723°C.
   i) Calcule el porcentaje en peso de la austenita presente en el acero.
   ii) Calcule el porcentaje en peso de la ferrita proeutectoide presente en el acero.

b) Un acero al carbono simple hipoeutectoide con 0.40% C es enfriado lentamente desde 940°C hasta una temperatura apenas por abajo de 723°C.
   i) Calcule el porcentaje en peso de la ferrita proeutectoide presente en el acero.
   ii) Calcule el porcentaje en peso de ferrita eutectoide y el porcentaje en peso de cementita eutectoide presentes en el acero.

■ **Solución**

Tomando como referencia la figura 9.6 y usando líneas de conexión:

a) i) $$\%\text{ en peso de austenita} = \frac{0.40 - 0.02}{0.80 - 0.02} \times 100\% = 50\% \blacktriangleleft$$

ii) $$\%\text{ en peso de ferrita proeutectoide} = \frac{0.80 - 0.40}{0.80 - 0.02} \times 100\% = 50\% \blacktriangleleft$$

b) i) El porcentaje en peso de ferrita proeutectoide presente en el acero apenas por abajo de 723°C será el mismo que apenas por arriba de 723°C, el cual es de 50 por ciento.

ii) Los porcentajes en peso de ferrita total y el de cementita apenas por debajo de 723°C son

$$\%\text{ en peso de ferrita total} = \frac{6.67 - 0.40}{6.67 - 0.02} \times 100\% = 94.3\%$$

$$\%\text{ en peso de cementita total} = \frac{0.40 - 0.02}{6.67 - 0.02} \times 100\% = 5.7\%$$

$$\%\text{ en peso de ferrita eutectoide} = \text{ferrita total} - \text{ferrita proeutectoide}$$

$$= 94.3 - 50 = 44.3\% \blacktriangleleft$$

$$\%\text{ en peso de cementita eutectoide} = \%\text{ en peso de cementita total} = 5.7\% \blacktriangleleft$$

(No se formó cementita proeutectoide durante el enfriamiento.)

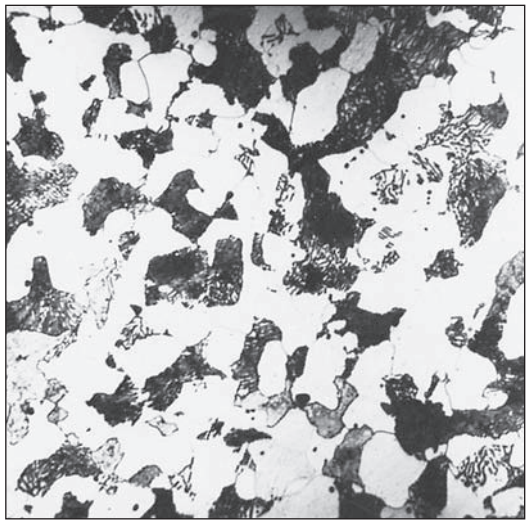


Figura 9.10
Microestructura de acero al carbono simple hipoeutectoide con 0.35% C, enfriado lentamente a partir de la región de austenita. El componente blanco es ferrita proeutectoide; el componente oscuro es perlita. (Decapante: 2% nital; amplificación 500×.)
(Según W. F. Smith, "Structure and Properties of Engineering Alloys", 2a. ed., McGraw-Hill, 1993, pág. 11.)

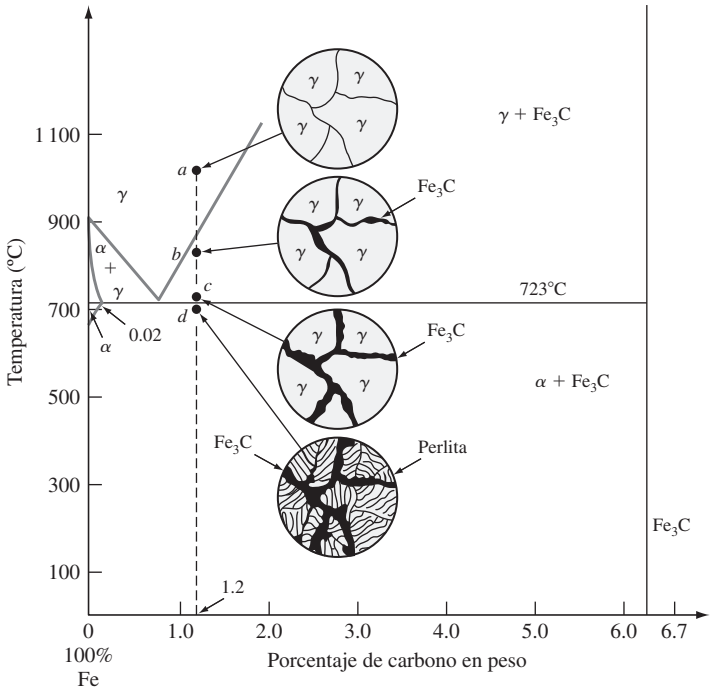


Figura 9.11
Transformación por enfriamiento lento de un acero al carbono simple hipereutectoide con 1.2% de C.
(Según W. F. Smith, "Structure and Properties of Engineering Alloys", 2a. ed., McGraw-Hill, 1993, pág. 12.)

Aceros al carbono simples hipereutectoides Si una muestra de acero al carbono simple con 1.2% C (acero hipereutectoide) es calentada a casi 950°C y se mantiene así el suficiente tiempo, toda su estructura llegará a estar formada esencialmente por austenita (punto *a* de la figura 9.11). Después, si ese acero se enfría muy lentamente hasta la temperatura *b* de la figura 9.11, la **cementita proeutectoide** empezará a nuclearse y crecerá principalmente en los límites del grano de la austenita. Si se sigue enfriando lentamente hasta llegar al punto *c* de la figura 9.11, el cual se encuentra apenas arriba de los 723°C, se producirá más cementita protoeutectoide lo que sucederá en las fronteras de grano de la austenita. Si las condiciones próximas al equilibrio se mantienen mediante enfriamiento lento, el contenido general de carbono de la austenita restante en la aleación cambiará de 1.2 a 0.8 por ciento.

Si el enfriamiento lento continúa hasta 723°C o muy ligeramente por debajo de esa temperatura, la austenita restante se transformará en perlita por la reacción eutectoide, según se indica en el punto *d* de la figura 9.11. La cementita formada por la reacción eutectoide se llama **cementita eutectoide** para distinguirla de la cementita proeutectoide que se forma a temperaturas arriba de los 723°C. Asimismo, la ferrita formada por la reacción eutectoide se denomina *ferrita eutectoide*. La figura 9.12 es una mi-

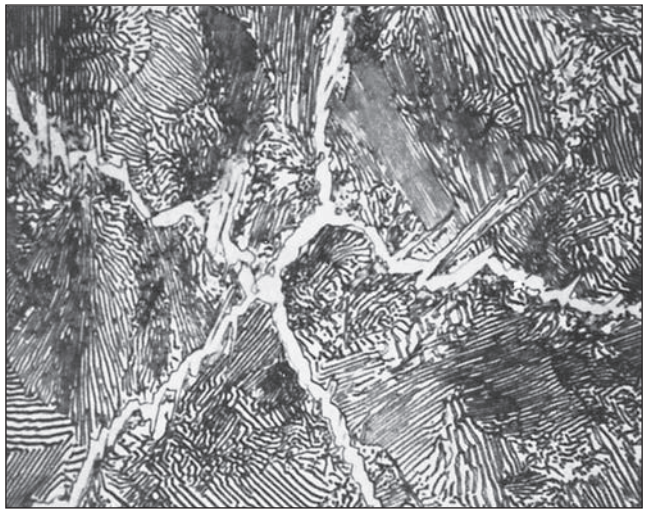


Figura 9.12
Microestructura de un acero hipereutectoide con 1.2% C, enfriado lentamente desde la región de austenita. En esta estructura, la cementita proeutectoide se muestra como el componente blanco que se ha formado en los límites del grano de la austenita anterior. La estructura restante está formada por perlita laminar gruesa. (Decapante: picral; amplificación 1 000×.)
(Cortesía de United States Steel Corp., Research Laboratory.)

crografía óptica de la estructura de un acero hipereutectoide con 1.2% C que fue austenitizada y enfriada lentamente hasta la temperatura ambiente.

PROBLEMA DE EJEMPLO 9.3

Un acero al carbono simple hipoeutectoide que se enfrió lentamente desde la región austenítica hasta la temperatura ambiente contiene 9.1 por ciento en peso de ferrita eutectoide. Suponiendo que no hay cambio de estructura con el enfriamiento desde una temperatura ligeramente inferior a la temperatura eutectoide hasta la temperatura ambiente, ¿cuál es el contenido de carbono en el acero?

■ Solución

Sea x = el porcentaje en peso de carbono en el acero hipoeutectoide. Ahora puede usarse la ecuación que relaciona la ferrita eutectoide con la ferrita total y la ferrita proeutectoide, que es

$$\text{Ferrita eutectoide} = \text{ferrita total} - \text{ferrita proeutectoide}$$

Usando la figura EP9.3 y la regla de palanca, puede plantearse la ecuación

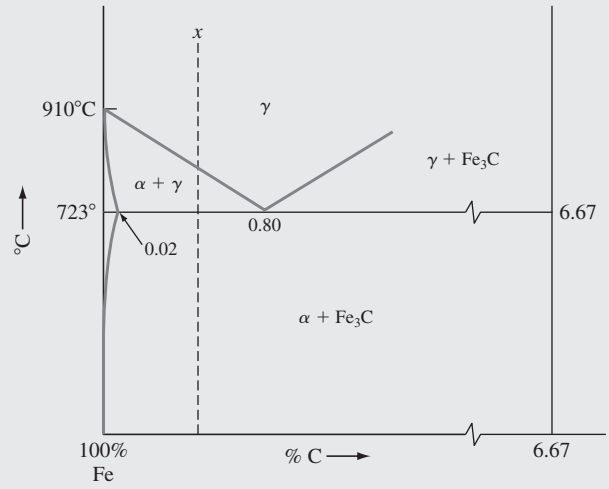


Figura EP9.3

$$0.091 = \underset{\substack{\text{Ferrita}\\\text{eutectoide}}}{\frac{6.67 - x}{6.67 - 0.02}} - \underset{\substack{\text{Ferrita}\\\text{proeutectoide}}}{\frac{0.80 - x}{0.80 - 0.02}} = \frac{6.67}{6.65} - \frac{x}{6.65} - \frac{0.80}{0.78} + \frac{x}{0.78}$$

Ferrita total

o bien $$1.28x - 0.150x = 0.091 - 1.003 + 1.026 = 0.114$$

$$x = \frac{0.114}{1.13} = 0.101\%\ \text{C} \blacktriangleleft$$

9.3 TRATAMIENTO CALÓRICO DE ACEROS AL CARBONO SIMPLES

Al modificar la forma en que los aceros al carbono simples son calentados y enfriados se pueden obtener distintas combinaciones en las propiedades mecánicas de los aceros resultantes. En esta sección se examinan algunos de los cambios estructurales y de propiedades que ocurren durante algunos tratamientos calóricos importantes a los que se someten los aceros al carbono simples.

9.3.1 Martensita

Formación de martensita Fe-C mediante el temple instantáneo Si una muestra de un acero al carbono simple en estado austenítico se enfría rápidamente hasta la temperatura ambiente mediante la inmersión en agua, su estructura se modificará de austenita a **martensita**. En los aceros al carbono simples, la martensita es una fase metaestable constituida por una solución sólida intersticial de carbono sobresaturada en hierro cúbico centrado o hierro tetragonal centrado (el carácter tetragonal lo causa una ligera distorsión en la celda de la unidad de hierro cúbico BCC). La temperatura en la cual se inicia la transformación de austenita a martensita, bajo enfriamiento, se conoce como *temperatura de inicio martensítico*, $\boldsymbol{M_s}$, y la temperatura a la cual finaliza dicha trans-

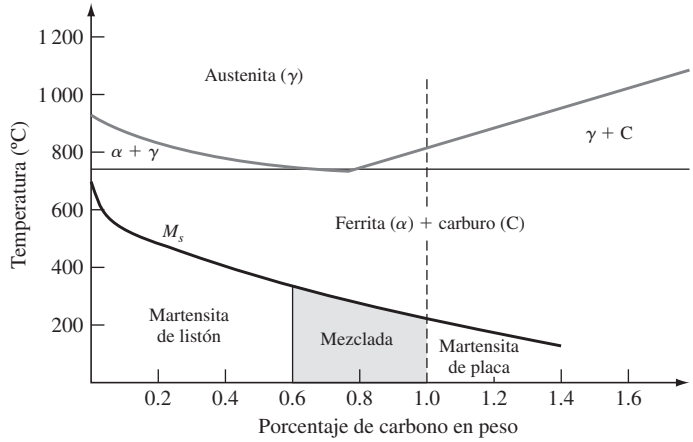


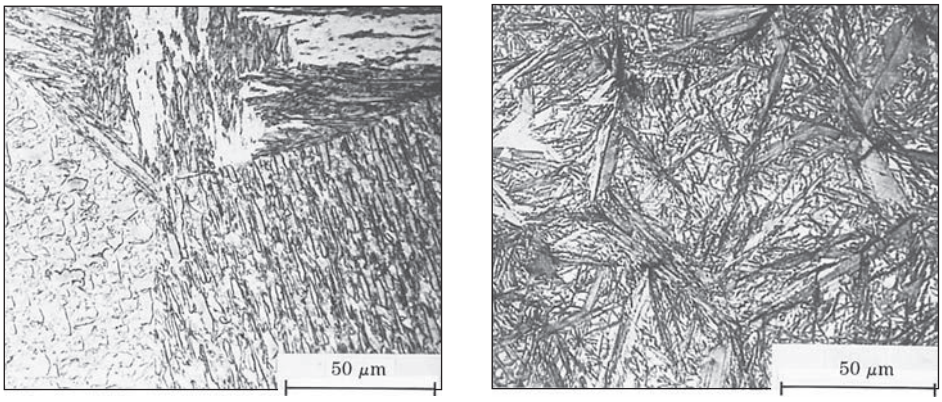
Figura 9.13
Efecto del contenido de carbono sobre la temperatura de inicio de la transformación martensítica, M_s, para aleaciones de hierro-carbono.
(Según A. R. Marder y G. Krauss, tal como se presenta en "Hardenability Concepts with Applications to Steel", AIME, 1978, pág. 238.)

formación se llama *temperatura de acabado martensítico*, M_f. La temperatura M_s para aleaciones Fe-C disminuye a medida que el porcentaje en peso de carbono aumenta en esas aleaciones, como se muestra en la figura 9.13.

Microestructura de las martensitas Fe-C La microestructura de las martensitas en aceros al carbono simples depende del contenido de carbono presente en el acero. Si el acero contiene menos de 0.6% C, aproximadamente, la martensita consiste en *dominios* de listones con orientaciones diferentes, pero limitadas a través de un dominio entero. La estructura interna de los listones está sumamente distorsionada porque consiste en regiones con altas densidades en las marañas de dislocación. La figura 9.14*a* es una micrografía óptica de *martensita de listón* en una aleación Fe-0.2% C a 600×, mientras que la figura 9.15 muestra la subestructura de martensita contenida en esa aleación, en una micrografía electrónica a 60 000×.

A medida que el contenido de carbono de las martensitas Fe-C se incrementa a más de 0.6% C, empieza a formarse un tipo diferente de martensita llamado *martensita de placa*. Por arriba de 1% C aproximadamente, las aleaciones Fe-C están formadas casi totalmente por martensita de placa. La figura 9.14*b* es una micrografía óptica de martensita de placa en una aleación Fe-1.2% C a 600×. Las placas de las martensitas Fe-C ricas en carbono varían en tamaño y tienen una estructura fina de maclas paralelas, como se muestra en la figura 9.16. Es frecuente que las placas estén rodeadas de largas cantidades de austenita no transformada (retenida). Las martensitas Fe-C con contenido de carbono de entre 0.6 y 1.0% C aproximadamente tienen microestructuras que incluyen martensitas tanto de tipo listón como de tipo placa.

Estructura de martensitas Fe-C en una escala atómica La transformación de la austenita en martensita en aleaciones Fe-C (aceros al carbono simples) se considera como un proceso *sin difusión* porque la transformación se produce tan rápidamente



a) *b*)

Figura 9.14
Efecto del contenido de carbono sobre la estructura de la martensita en aceros al carbono simples: *a*) tipo listón, *b*) tipo placa. (Decapante: bisulfito de sodio; micrografías ópticas.)
[Según A. R. Marder y G. Krauss, Trans. ASM, **60:***651(1967).]*

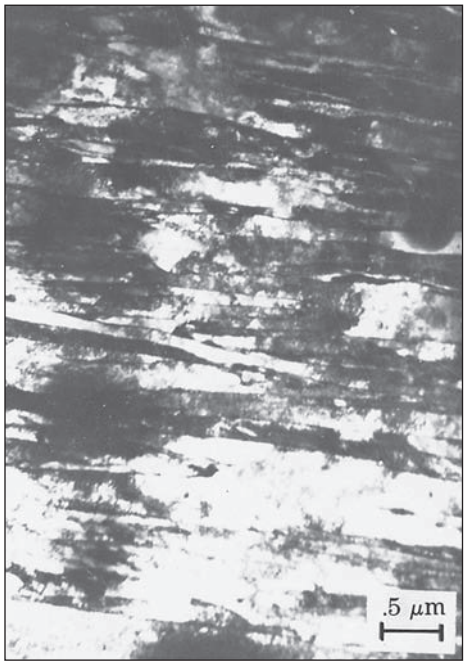


Figura 9.15
Estructura de martensita de listón en una aleación Fe-0.2% C. (Observe la alineación paralela de los listones.)
[Según A. R. Marder y G. Krauss, Trans. ASM, **60:***651(1967).]*

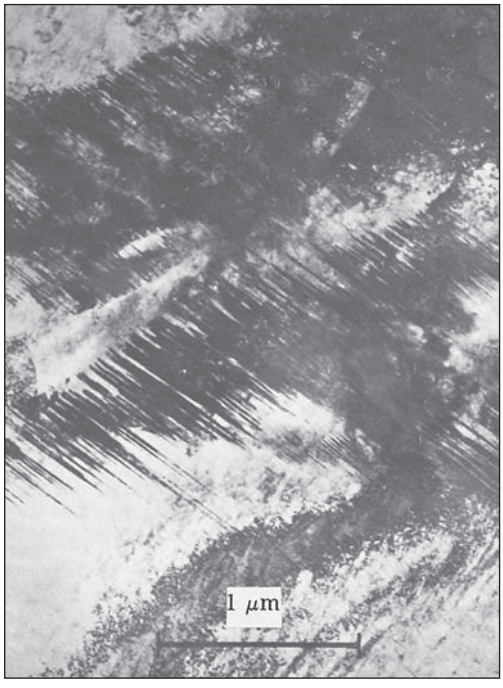
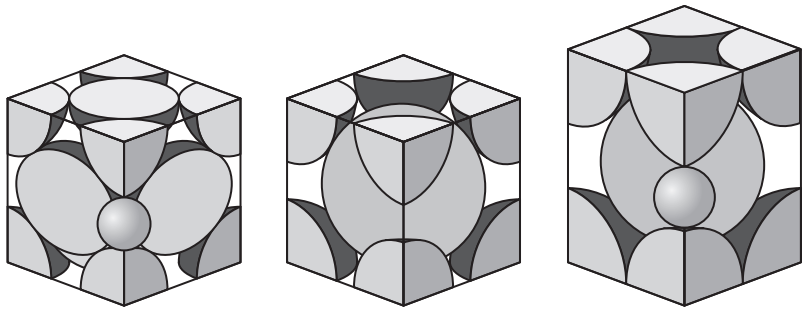


Figura 9.16
Martensita de placa que muestra las maclas de transformación finas.
[Según M. Oka y C. M. Wayman, Trans. ASM, **62:***370(1969).]*



MatVis

Figura 9.17
a) Celda unidad de hierro γ cúbico centrado en las caras (FCC) que muestra un átomo de carbono en un gran hueco intersticial a lo largo del borde cúbico de la celda. *b*) Celda unidad de hierro α cúbica centrada en el cuerpo (BCC) que muestra un hueco intersticial más pequeño entre los átomos del borde cúbico de la celda unidad. *c*) Celda unidad de hierro BCT (tetragonal centrada en el cuerpo) producida por la distorsión de la celda unidad BCC debido al átomo de carbono intersticial.
(Según E. R. Parker y V. F. Zackay, Strong and Ductile Steels, Sci. Am., noviembre de 1968, pág. 36; Copyright © por Scientific American, Inc; reservados todos los derechos.)

que los átomos no tienen tiempo para mezclarse entre sí. Según parece no existe una barrera energética de activación térmica que impida la formación de martensita. Se cree también que después de la reacción no se produce cambio alguno en la composición de la fase generatriz y que cada átomo tiende a retener a sus vecinos originales. Las posiciones relativas de los átomos de carbono con respecto a los átomos de hierro en la martensita son las mismas que existían en la austenita.

En las martensitas Fe-C cuyo contenido de carbono es menor de 0.2% C aproximadamente, la austenita se transforma en una estructura de cristales de ferrita α cúbica centrada en el cuerpo (BCC). A medida que el contenido de carbono de las aleaciones Fe-C se incrementa, la estructura cc BCC se distorsiona en una estructura cristalina BCT (*tetragonal centrada en el cuerpo*). El hueco intersticial más grande en la estructura cristalina ccc de hierro γ tiene un diámetro de 0.104 nm (figura 9.17*a*), mientras que el hueco intersticial más grande en la estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) de hierro α tiene un diámetro de 0.072 nm (figura 9.17*b*). Puesto que el átomo de carbono tiene un diámetro de 0.154 nm, se puede acomodar en la solución sólida intersticial en mayor medida en la red de hierro γ cúbica centrada en las caras (FCC). Cuando las martensitas Fe-C con más de 0.2% C aproximadamente se producen por enfriamiento rápido de la austenita, el espaciamiento intersticial reducido de la red BCC hace que los átomos de carbono distorsionen la celda unidad BCC a lo largo de su eje *c* para acomodar los átomos de carbono (figura 9.17*c*). La figura 9.18 muestra cómo el eje *c* de la red de martensita Fe-C se alarga a medida que aumenta su contenido de carbono.

Dureza y solidez de martensitas Fe-C La dureza y solidez de las martensitas Fe-C están directamente relacionadas con el contenido de carbono y aumentan a medida que dicho contenido se incrementa (figura 9.19). Sin embargo, la ductilidad y la tenacidad disminuyen también cuando aumenta el contenido de carbono, por lo que la mayoría

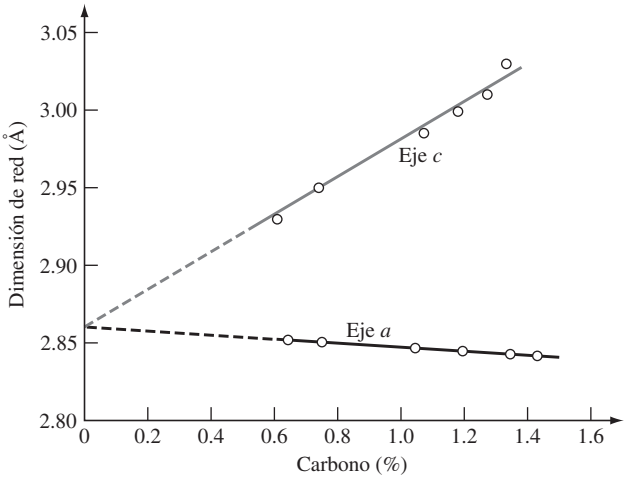


Figura 9.18
Variación de los ejes *a* y *c* de la red de martensita Fe-C en función del contenido de carbono.
(Según E. C. Bain y H. W. Paxton, "Alloying Element in Steel", 2a. ed., American Society for Metals, 1966, pág. 36.)

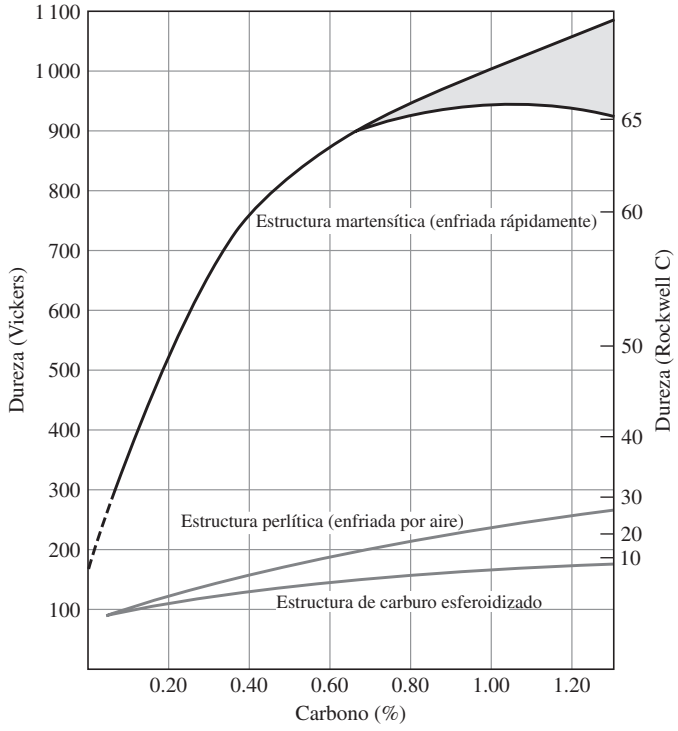


Figura 9.19
Dureza aproximada de acero al carbono simple martensítico totalmente endurecido en función del contenido de carbono. La región sombreada indica una posible pérdida de dureza a causa de la formación de austenita retenida, la cual es más blanda que la martensita.
(Según E. C. Bain y H. W. Paxton, "Alloying Element in Steel", 2a. ed., American Society for Metals, 1966, pág. 37.)

de los aceros al carbono simples martensíticos son revenidos por recalentamiento a una temperatura inferior a la temperatura de transformación de 723°C.

Las martensitas Fe-C bajas en carbono se endurecen por la formación de altas concentraciones de dislocaciones (martensita de listón) y mediante el fortalecimiento de la solución sólida intersticial por átomos de carbono. La alta concentración de dislocaciones en las redes (martensita de listón) hace que a otras dislocaciones les sea difícil movilizarse. Cuando el contenido de carbono aumenta por arriba de 0.2 por ciento, el endurecimiento de la solución sólida intersticial adquiere más importancia y la estructura de hierro BCC se llega a distorsionar para adquirir una forma tetragonal. Sin embargo, en las martensitas Fe-C con alto contenido de carbono, las numerosas interfases dispuestas como maclas en la martensita de placa contribuyen también a la dureza.

9.3.2 Descomposición isotérmica de la austenita

Diagrama de transformación isotérmica para un acero al carbono simple eutectoide En secciones anteriores se describieron los productos de reacción de la descomposición de la austenita de aceros al carbono simples eutectoides en condiciones de enfriamiento muy lento y rápido. Consideremos ahora qué productos de reacción se forman cuando la austenita de aceros eutectoides es enfriada rápidamente a temperaturas por debajo de la temperatura eutectoide y después es *transformada isotérmicamente*.

Se pueden realizar experimentos de transformación isotérmica para investigar los cambios microestructurales que corresponden a la descomposición de austenita eutectoide, utilizando diversas muestras pequeñas, cada una del tamaño aproximado de una moneda de diez centavos. Las muestras se austenitizan primero en un horno a una temperatura superior a la temperatura eutectoide (figura 9.20*a*). A continuación, las muestras se enfrían con rapidez (temple instantáneo) en un baño de sal líquida a la temperatura deseada, por abajo de la temperatura eutectoide (figura 9.20*b*). Al cabo de diversos intervalos las muestras se sacan del baño de sal, una por una, y se enfrían rápidamente sumergiéndolas en agua a temperatura ambiente (figura 9.20*c*). De este modo, la microestructura obtenida al cabo de cada tiempo de transformación puede examinarse a la temperatura ambiente.

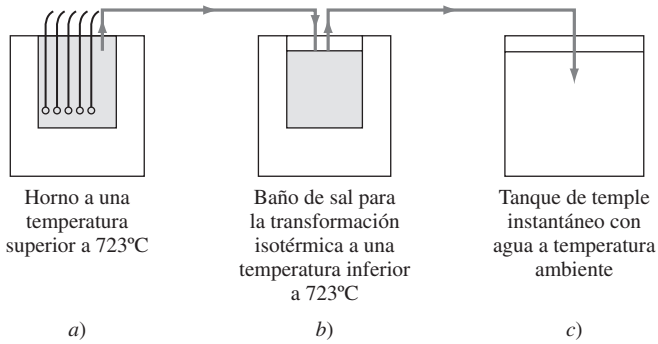


Figura 9.20
Dispositivo experimental para determinar los cambios microscópicos producidos durante la transformación isotérmica de la austenita de un acero al carbono simple eutectoide.
(Según W. F. Smith, "Structure and Properties of Engineering Alloys", McGraw-Hill, 1981, pág. 14.)

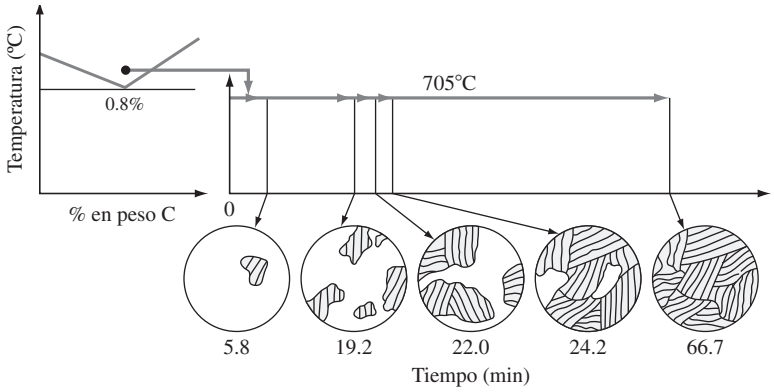


Figura 9.21
Experimento para seguir los cambios microestructurales que se producen durante la transformación isotérmica de un acero al carbono simple eutectoide a 705°C. Después de austenitizadas, las muestras se enfrían rápidamente en un baño de sal a 705°C, donde permanecen durante los tiempos aquí indicados, y luego se enfrían con agua a temperatura ambiente.
(Según W. F. Smith, "Structure and Properties of Engineering Alloys", McGraw-Hill, 1981, pág. 14.)

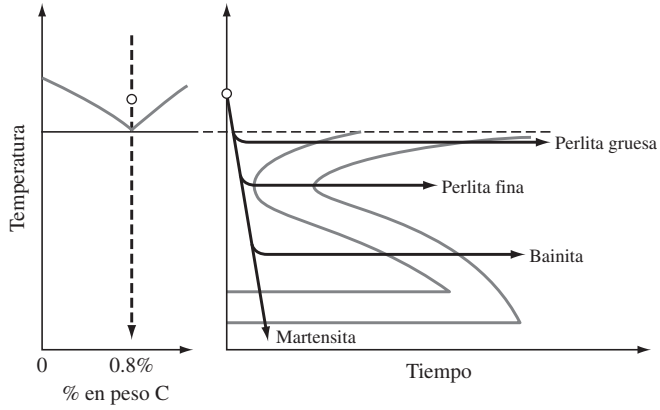


Figura 9.22
Diagrama de transformación isotérmica para un acero al carbono simple eutectoide que muestra su relación con el diagrama de fases Fe-Fe_3C.

Considere los cambios microestructurales que ocurren durante la transformación isotérmica de un acero al carbono simple eutectoide a 705°C, como se muestra esquemáticamente en la figura 9.21. Después de ser austenitizadas, las muestras se templan en caliente en un baño de sal a 705°C. Después de aproximadamente 6 minutos ya se formó una pequeña cantidad de perlita gruesa. Al cabo de casi 67 min, la austenita se transformó totalmente en perlita gruesa.

Si se repite el mismo procedimiento para la transformación isotérmica de aceros eutectoides a temperaturas cada vez más bajas, se puede construir un **diagrama de**

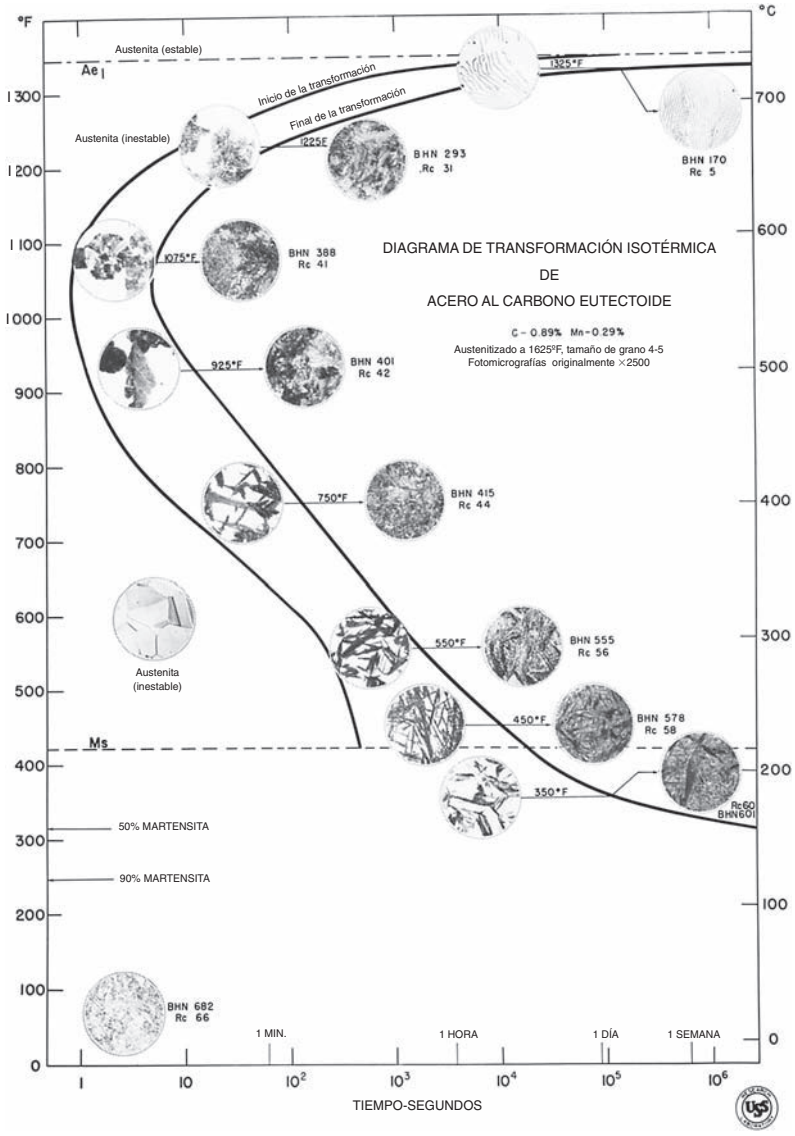
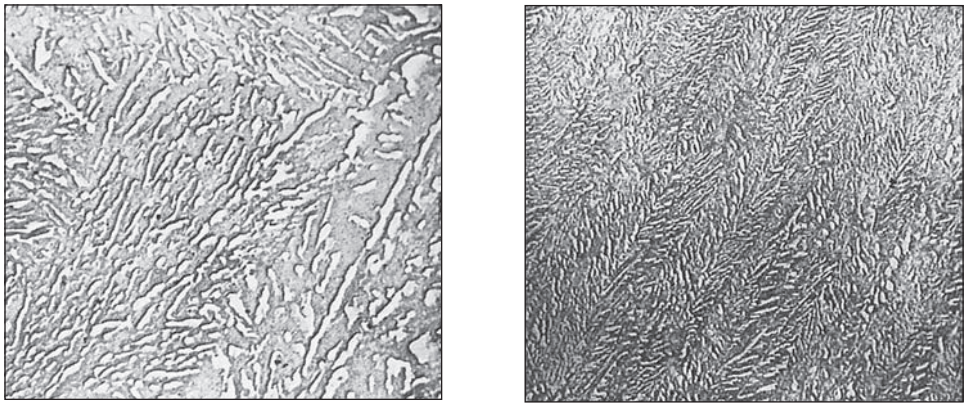


Figura 9.23
Diagrama de transformación isotérmica de un acero eutectoide.
(Cortesía de United States Steel Corp., Research Laboratory.)

transformación isotérmica (TI) como se muestra esquemáticamente en la figura 9.22 y a partir de los datos experimentales de la figura 9.23. La curva en forma de S que está junto al eje de temperaturas indica el tiempo necesario para que la transformación isotérmica de austenita comience y la segunda curva S señala el tiempo necesario para que la transformación se complete.

Las transformaciones isotérmicas de aceros eutectoides a temperaturas de entre 723 y 550°C aproximadamente producen microestructuras perlíticas. Cuando la temperatura de transformación desciende dentro de este rango, la perlita cambia de la es-



a) *b*)

Figura 9.24
a) Microestructura de la bainita superior que se forma por medio de una transformación completa de un acero eutectoide a 450°C (850°F). *b*) Microestructura de bainita inferior formada mediante la transformación completa de un acero eutectoide a 260°C (500°F). Las partículas blancas son Fe_3C y la matriz oscura es ferrita. (Micrografías electrónicas, tipo réplica; amplificación 15 000×.)
[Según H. E. McGannon (ed.), "The Making, Shaping, and Treating of Steel", 9a. ed., United States Steel Corp., 1971.]

tructura gruesa a la estructura fina (figura 9.23). El templado rápido (enfriamiento) de un acero eutectoide a partir de temperaturas superiores a 723°C, en las que se encuentra en condición austenítica, transforma la austenita en martensita, como lo hemos analizado con anterioridad.

Si los aceros eutectoides en condición austenítica se templan en caliente a temperaturas dentro del rango de 550 a 250°C y se transforman isotérmicamente, se produce una estructura intermedia entre la perlita y la martensita, llamada **bainita**.[5] La bainita en aleaciones Fe-C puede definirse también como un producto de descomposición austenítico que tiene una *estructura eutectoide no lamelar* de ferrita α y cementita (Fe_3C). Para aceros al carbono simples eutectoides, se hace una distinción entre la *bainita superior*, que se forma por transformación isotérmica a temperaturas de entre 550 y 350°C aproximadamente, y la *bainita inferior*, que se forma entre unos 350 y 250°C. La figura 9.24*a* muestra una micrografía electrónica (tipo réplica) de la microestructura de la bainita superior para un acero al carbono simple eutectoide, y la figura 9.24*b* muestra la que corresponde a la bainita inferior. La bainita superior tiene grandes regiones de cementita semejantes a varillas, mientras que la bainita inferior tiene partículas de cementita mucho más finas. A medida que la temperatura de transformación disminuye, los átomos de carbono ya no pueden difundirse con la misma facilidad y, por lo tanto, la estructura de la bainita inferior tiene partículas de cementita más pequeñas.

[5] La bainita recibe su nombre de E. C. Bain, el metalurgista estadounidense que fue el primero en estudiar intensivamente las transformaciones isotérmicas de los aceros. Véase E. S. Davenport y E. C. Bain, *Trans. AIME*, **90:**117 (1930).

PROBLEMA DE EJEMPLO 9.4

Trozos pequeños y delgados de tiras de acero 1080 de 0.25 mm de espesor laminadas en caliente son calentados durante 1 h a 850°C y después se les dan los tratamientos térmicos mencionados en la lista siguiente. Usando el diagrama de transformación isotérmica de la figura 9.23, determine las microestructuras de las muestras después de cada tratamiento térmico.

a) Templado con agua a temperatura ambiente.
b) Templado en caliente en sal fundida a 690°C y mantenido 2 h; templado en agua.
c) Templado en caliente a 610°C y mantenido 3 min; templado en agua.
d) Templado en caliente a 580°C y mantenido 2 s; templado en agua.
e) Templado en caliente a 450°C y mantenido 1 h; templado en agua.
f) Templado en caliente a 300°C y mantenido 30 min; templado en agua.
g) Templado en caliente a 300°C y mantenido 5 h; templado en agua.

■ Solución

Los patrones de enfriamiento se muestran en la figura EP9.4 y las microestructuras obtenidas aparecen en la siguiente lista:

a) Solamente martensita.
b) Sólo perlita gruesa.
c) Sólo perlita fina.
d) Aproximadamente 50% de perlita fina y 50% de martensita.
e) Sólo bainita superior.
f) Aproximadamente 50% de bainita inferior y 50% de martensita.
g) Sólo bainita inferior.

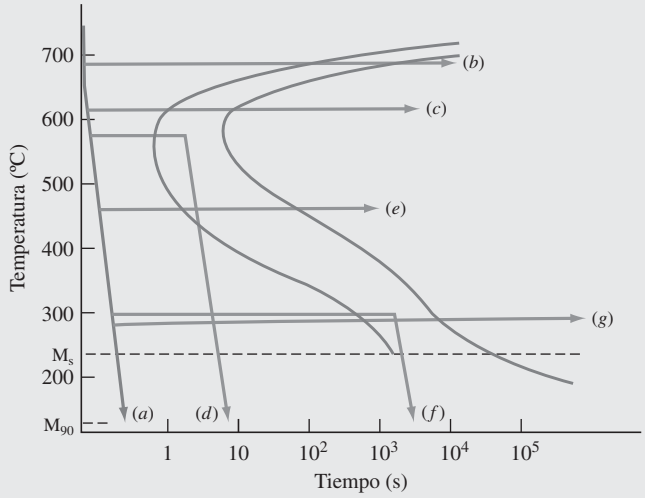


Figura EP9.4
Diagrama de transformación isotérmica para un acero al carbono simple eutectoide, indicando diversos patrones de enfriamiento.

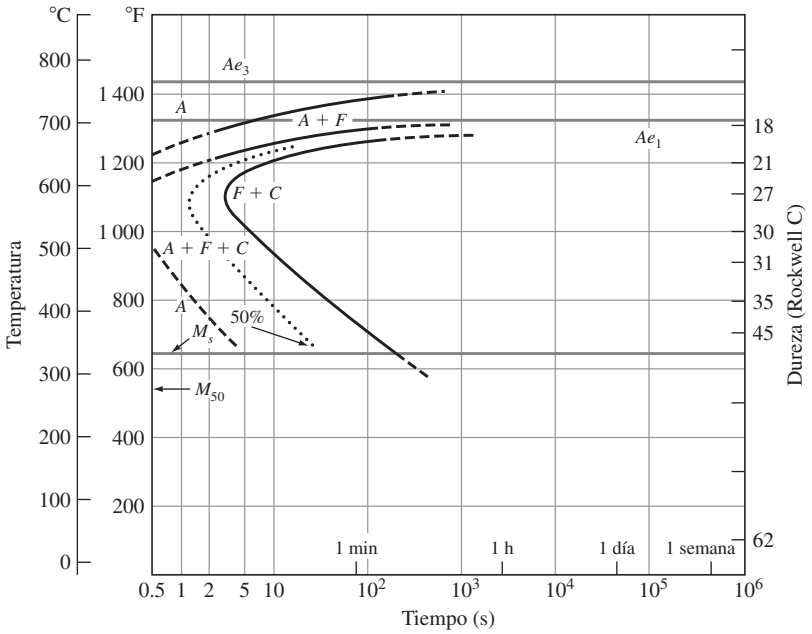


Figura 9.25
Diagrama de transformación isotérmica para un acero hipoeutectoide que contiene 0.47% de C y 0.57% de Mn (temperatura de austenitizado: 843°C).
[Según R. A. Grange, V. E. Lambert y J. J. Harrington, Trans. ASM. **51***:377(1959).]*

Diagramas de transformación isotérmica para aceros al carbono simples no eutectoides Los diagramas de transformación isotérmica ya se determinaron para los aceros al carbono simples no eutectoides. En la figura 9.25 se muestra un diagrama de TI para un acero al carbono simple con estructura 0.47 por ciento hipoeutectoide. Varias diferencias son evidentes entre el diagrama TI de un acero al carbono simple no eutectoide y el diagrama de uno eutectoide (figura 9.23). Una diferencia importante es que las curvas S del acero hipoeutectoide han sido desplazadas hacia la izquierda, por lo cual no es posible templar este acero a partir de la región austenítica para producir una estructura totalmente martensítica.

Una segunda diferencia importante es que se ha añadido otra línea de transformación para la parte superior del diagrama TI de acero eutectoide que indica el inicio de la formación de ferrita proeutectoide. Por tanto, a temperaturas entre 723 y 765°C aproximadamente, sólo se produce ferrita proeutectoide por transformación isotérmica.

Se han determinado diagramas TI similares para aceros al carbono simple hipereutectoides. Sin embargo, en este caso, la línea que está más arriba en el diagrama de esos aceros representa el inicio de la formación de cementita proeutectoide.

9.3.3 Diagrama de transformación por enfriamiento continuo para un acero al carbono simple eutectoide

En las operaciones industriales a base de tratamiento calórico, la mayoría de las veces el acero no transforma isotérmicamente a una temperatura superior a la temperatura inicial

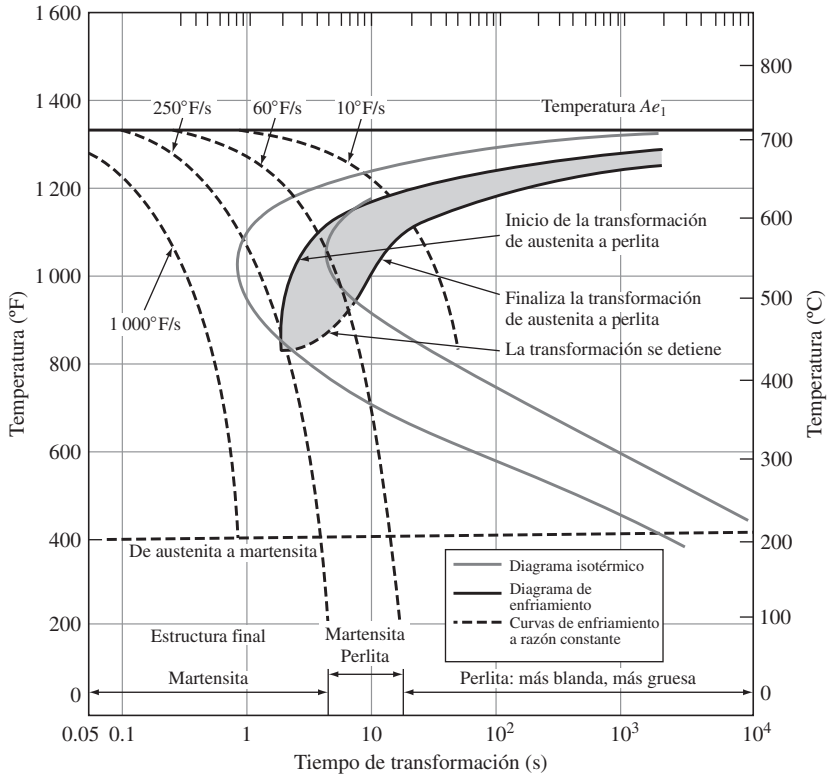


Figura 9.26
Diagrama de enfriamiento continuo para un acero eutectoide al carbono simple.
(Según R. A. Grange y J. M. Kiefer como aparece en la adaptación publicada en E. C. Bain y H. W. Paxton, "Alloying Elements in Steel", 2a. ed., American Society for Metals, 1966, pág. 254.)

de la martensita, sino que se enfría continuamente desde la temperatura de austenita hasta la temperatura ambiente. En un acero al carbono simple bajo enfriamiento continuo, la transformación de austenita a perlita se produce en todo un rango de temperaturas y no a una sola temperatura isotérmica. En consecuencia, la microestructura final después del enfriamiento continuo será compleja, ya que la cinética de la reacción cambia a lo largo del rango de temperaturas dentro del cual se realiza la transformación. En la figura 9.26 se muestra un **diagrama de transformación por enfriamiento continuo (TEC)**, sobrepuesto a un diagrama TI para un acero al carbono simple eutectoide. En el diagrama de enfriamiento continuo, las líneas de inicio y final de la transformación están desplazadas a tiempos más prolongados y temperaturas un poco más bajas, en relación con el diagrama isotérmico. Tampoco hay líneas de transformación por abajo de 450°C, aproximadamente, para la transformación de austenita a bainita.

La figura 9.27 muestra distintas velocidades de enfriamiento para muestras pequeñas de aceros al carbon simples eutectoides sometidos a enfriamiento continuo desde la región austenítica hasta la temperatura ambiente. La curva de enfriamiento *A* representa un proceso de enfriamiento muy lento, como el que se obtiene cuando un

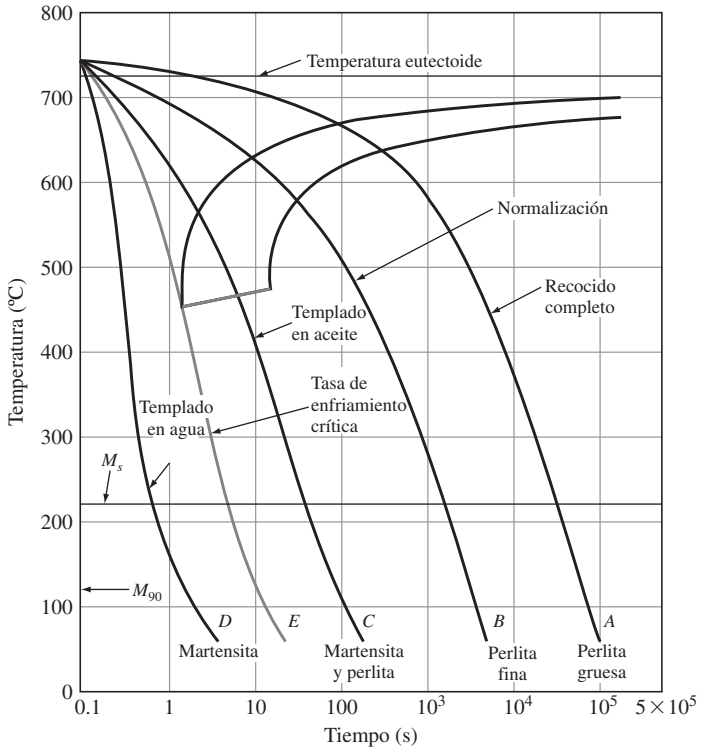


Figura 9.27
Variación en la microestructura de un acero al carbono simple eutectoide bajo distintas velocidades de enfriamiento continuo.
(Tomado de R. E. Reed-Hill, "Physical Metallurgy Principles", 2a. ed., D. Van Nostrand Co., 1973 © PWS Publishers.)

horno eléctrico se apaga y se deja que el acero se enfríe junto con el horno. En este caso, la microestructura sería perlita gruesa. La curva de enfriamiento *B* representa un enfriamiento más rápido, como el obtenido al extraer un acero austenitizado del horno, permitiendo luego que el acero se enfríe en contacto con el aire. En este caso se forma una microestructura de perlita fina.

La curva de enfriamiento *C* de la figura 9.27 comienza con la formación de perlita, pero en ese caso no hubo tiempo suficiente para completar la transformación de austenita a perlita. La austenita restante que no se transformó en perlita a las temperaturas más altas se transformará en martensita a temperaturas más bajas, a partir de unos 220°C. Este tipo de transformación recibe el nombre de *transformación dividida* porque ocurre en dos pasos. Por tanto, la microestructura del acero consistirá en una mezcla de perlita y martensita. El enfriamiento a una velocidad más rápida que la de la curva *E* de la figura 9.27, conocido como la *velocidad crítica de enfriamiento*, produce una estructura martensítica totalmente endurecida.

Se han determinado los diagramas de enfriamiento continuo para muchos aceros al carbono simples de tipo hipoeutectoide, los cuales son más complejos porque a bajas temperaturas se forma también cierta cantidad de estructuras bainíticas durante el enfriamiento continuo. El análisis de esos diagramas está fuera del alcance de este libro.

9.3.4 Recocido y normalización de aceros al carbono simples

En el capítulo 6 se analizaron los procesos de trabajo en frío y de recocido para los metales; ahora debe hacerse referencia a esa sección. Los dos tipos de procesos de recocido más comunes que se aplican a los aceros al carbono simples de uso comercial son el *recocido completo* y el *recocido de proceso*.

En el recocido completo, los aceros hipoeutectoides y eutectoides se calientan en la región de la austenita aproximadamente 40°C por arriba del límite de la estructura austenita-ferrita (figura 9.28), se les mantiene el tiempo necesario a la temperatura alta y después se enfrían lentamente hasta alcanzar la temperatura ambiente, todo esto se efectúa usualmente en el horno en el que fueron calentados. En el caso de aceros hipereutectoides, la costumbre es austenizarlos en la región bifásica de austenita más cementita (Fe_3C), casi 40°C por arriba de la temperatura eutectoide. La microestructura de los aceros hipoeutectoides después del recocido completo consiste en ferrita proeutectoide y perlita (figura 9.10).

El recocido de proceso, al que a menudo se hace referencia como un *relajamiento de esfuerzos interiores*, ablanda parcialmente los aceros bajos en carbono trabajados en frío, porque relaja los esfuerzos internos provocados por el trabajo en frío. Este tratamiento, que suele aplicarse principalmente a los aceros hipoeutectoides con menos de 0.3% C, se efectúa a una temperatura por abajo de la temperatura eutectoide, por lo general entre 550 y 650°C (figura 9.28).

La *normalización* es un tratamiento calórico en el que el acero se calienta en la región austenítica y después se enfría en aire en reposo. La microestructura de las sec-

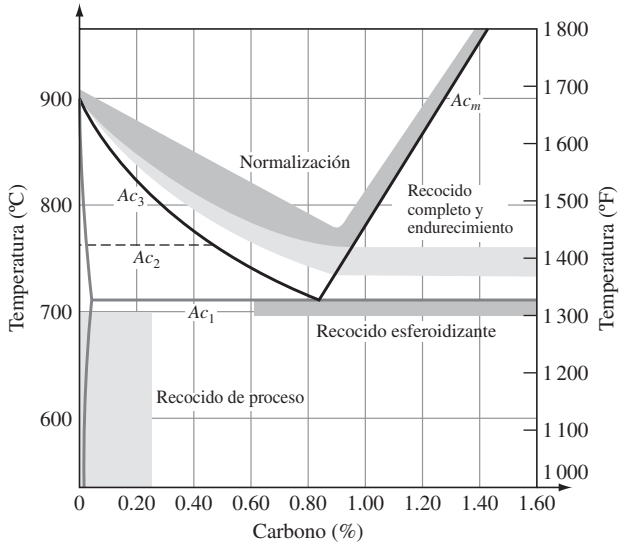


Figura 9.28
Rangos de temperatura comúnmente usados para el recocido de aceros al carbono simples.
(Según T. G. Digges et al., "Heat Treatment and Properties of Iron and Steel", NBS Monograph 88, 1966, pág. 10.)

ciones delgadas de los aceros al carbono simples hipoeutectoides normalizados corresponde a la de la ferrita proeutectoide y a la de la perlita fina. Los propósitos de la normalización varían. Algunos de ellos son:

1. Para refinar la estructura del grano

2. Para incrementar la solidez del acero (en comparación con el acero recocido)

3. Para reducir la segregación de los componentes en operaciones de fundición o forjado, y conseguir así una estructura más uniforme

En la figura 9.28 se muestran los rangos de temperaturas de austenitizado que se usan para la normalización de aceros al carbono simples. La normalización es más económica que el recocido completo porque no se necesita un horno para controlar la velocidad de enfriamiento del acero.

9.3.5 Revenido de aceros al carbono simples

El proceso de revenido El **revenido** es el proceso de calentar un acero martensítico a una temperatura por abajo de la temperatura de transformación eutectoide con la finalidad de hacerlo más blando y más dúctil. La figura 9.29 ilustra esquemáticamente el proceso habitual de templado y revenido para un **acero al carbon simple**. Como se muestra en la figura 9.29, el acero es austenitizado primero y luego se templa a una velocidad rápida para producir martensita y evitar así la transformación de la austenita en ferrita y cementita. Después, el acero se vuelve a calentar a una temperatura por abajo de la temperatura eutectoide para reblandecer la martensita al transformarla en una estructura de partículas de carburo de hierro en una matriz de ferrita.

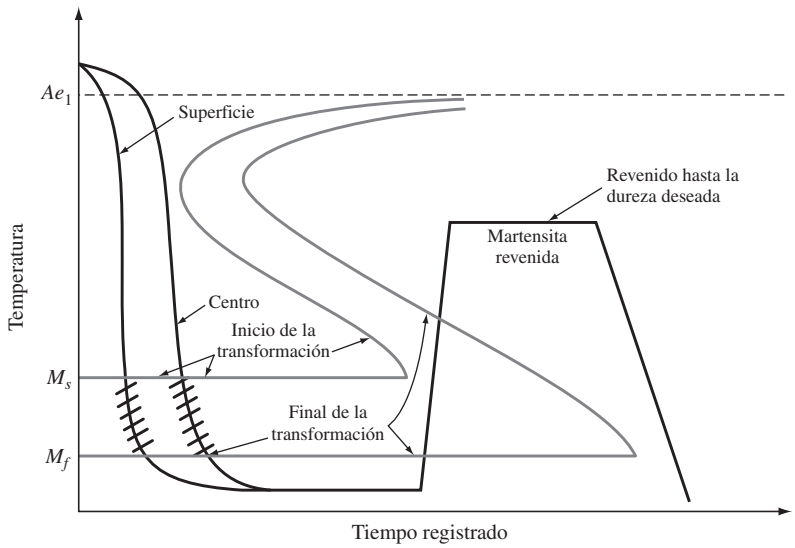


Figura 9.29
Diagrama esquemático que ilustra el proceso habitual de temple y revenido para un acero al carbono simple.
(Tomado de "Suiting the Heat Treatment to the Job", United States Steel Corp., 1968, pág. 34.)

Cambios en la microestructura de la martensita durante el revenido La martensita es una estructura metaestable y se descompone al recalentarla. En las martensitas de listón de aceros al carbono simples con bajo contenido de carbono hay una alta densidad de dislocación y esas dislocaciones proveen sitios de más baja energía, para átomos de carbono, que sus posiciones intersticiales normales. Por tanto, cuando los aceros martensíticos bajos en carbono se revienen por primera vez en el rango de 20 a 200°C, los átomos de carbono se segregan para ir a esos sitios de más baja energía.

Para los aceros al carbono simples martensíticos con más de 0.2 por ciento de carbono, la principal forma de redistribución del carbono a temperaturas de revenido por abajo de 200°C es la agrupación por precipitación. En este rango de temperaturas se forma un precipitado de tamaño muy pequeño que se llama *carburo épsilon (ϵ)*. El carburo que se forma cuando los aceros martensíticos se revienen de 200 a 700°C es la *cementita*, Fe_3C. Cuando los aceros se revienen en el rango de 200 a 300°C, la forma del precipitado se asemeja a varillas (figura 9.30). A temperaturas de revenido más altas, de 400 a 700°C, los carburos en forma de varillas se colapsan para crear partículas esféricas. La martensita revenida que muestra la cementita colapsada en el microscopio óptico recibe el nombre de **esferoidita** (figura 9.31).

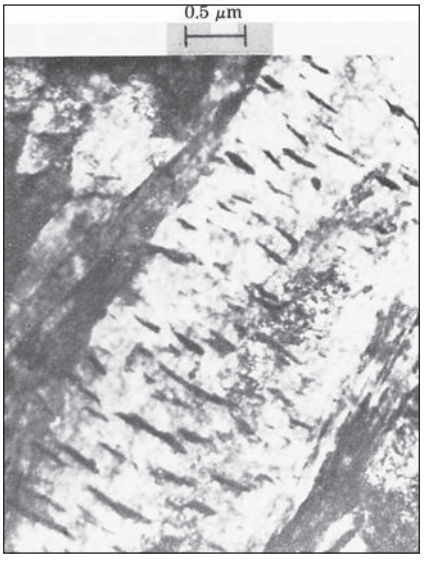


Figura 9.30
Precipitación de Fe_3C en martensita Fe-0.39% C revenida durante 1 h a 300°C. (Micrografía electrónica.)
[Según G. R. Speich y W. C. Leslie, Met. Trans., **31:***1043(1972).]*

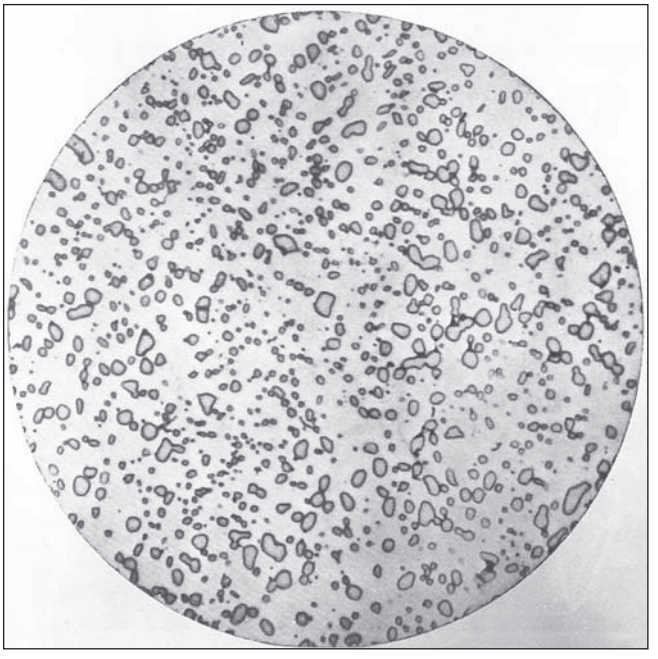


Figura 9.31
Esferoidita en un acero hipereutectoide con 1.1% C. (Amplificación 1 000×.)
(Según J. Vilella, E. C. Bain y H. W. Paxton, "Alloying Elements in Steel", 2a. ed., American Society for Metals, 1966, pág. 101.)

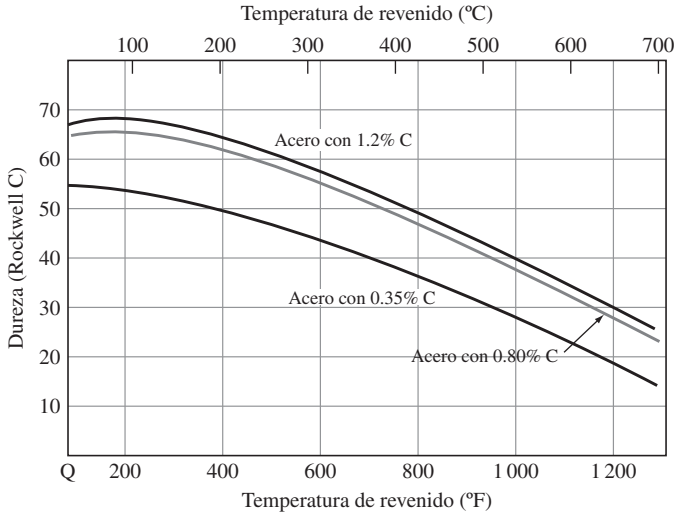


Figura 9.32
Dureza de martensitas de hierro-carbono (0.35 a 1.2% C) revenidas durante 1 h a las temperaturas indicadas.
(Según E. C. Bain y H. W. Paxton, "Alloying Elements in Steel", 2a. ed., American Society for Metals, 1966, pág. 38.)

Efecto de la temperatura de revenido sobre la dureza de aceros al carbon simples La figura 9.32 muestra el efecto que tiene el incremento de la temperatura sobre la dureza de varios aceros al carbon simples martensíticos. A más de 200°C aproximadamente, la dureza disminuye poco a poco a medida que la temperatura se eleva hasta 700°C. Esta disminución gradual de la dureza de la martensita con el aumento de la temperatura se debe sobre todo a la difusión de los átomos de carbono que salen de sus sitios en la red intersticial, sometidos a esfuerzos, para formar precipitados de carburo de hierro en una segunda fase.

Tratamiento térmico de la martensita (martemplado) El **tratamiento térmico de la martensita (martemplado)** es un tratamiento modificado que se usa con los aceros para minimizar la distorsión y el agrietamiento que se pueden producir durante el enfriamiento irregular del material sometido a tratamiento térmico. El proceso de martemperizado consiste en (1) austenitizado del acero, (2) temple del mismo en aceite caliente o sal fundida a una temperatura apenas por arriba (o ligeramente por abajo) de la temperatura M_s, (3) permanencia del acero en el medio de templado hasta que la temperatura sea totalmente uniforme y suspensión de este tratamiento isotérmico antes que se inicie la transformación de austenita a bainita, y (4) enfriamiento a una velocidad moderada hasta la temperatura ambiente para evitar grandes diferencias de temperatura. A continuación, el acero se reviene con el tratamiento convencional. La figura 9.33 muestra una trayectoria de enfriamiento para el proceso de martemperizado.

La estructura del acero obtenido por martemperizado es de *martensita*, y la del acero sometido a martemperizado (martemplado) que se obtiene por un tratamiento subsecuente es la de la *martensita revenida*. La tabla 9.2 enlista algunas de las propiedades mecánicas de un acero al carbono simple con 0.95% C después de ser sometido a martemperizado y al revenido junto con las de los aceros que se obtienen median-

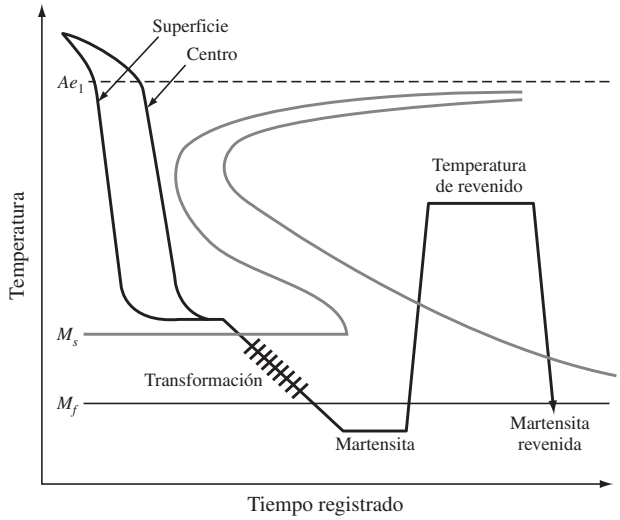


Figura 9.33
Curva de enfriamiento para el martemperizado (martemplado) sobrepuesta a un diagrama de acero al carbono simple eutectoide. La interrupción del templado reduce los esfuerzos que se crean en el metal durante ese proceso.
(Según "Metals Handbook", vol. 2, 8a. ed., American Society for Metals, 1964, pág. 37.)

Tabla 9.2 Algunas propiedades mecánicas (a 20°C) de un acero 1095 obtenido por austemperizado, en comparación con otros tratamientos térmicos

Tratamiento térmico	Dureza Rockwell C	Impacto (pie · lb)	Elongación en 1 pulg (%)
Temple en agua y revenido	53.0	12	0
Temple en agua y revenido	52.5	14	0
Martemperizado y revenido	53.0	28	0
Martemperizado y revenido	52.8	24	0
Austemperizado	52.0	45	11
Austemperizado	52.5	40	8

Fuente: "Metals Handbook", vol. 2, 8a. ed., American Society for Metals, 1964.

te el temple y revenido convencionales. La diferencia principal entre esos dos conjuntos de propiedades es que el acero martemperizado y revenido tiene valores de energía de impacto más altos. Es preciso señalar que el término *martemperizado* puede inducir a error y que un término más adecuado para ese proceso es *martemplado*.

Austemperizado El **austemperizado** es un tratamiento isotérmico que produce una estructura de bainita en algunos aceros al carbono simples. El proceso es un procedimiento opcional, en lugar del temple y revenido, para incrementar la tenacidad y ductilidad de algunos aceros. En el proceso de austemperizado, el acero es austenitizado pri-

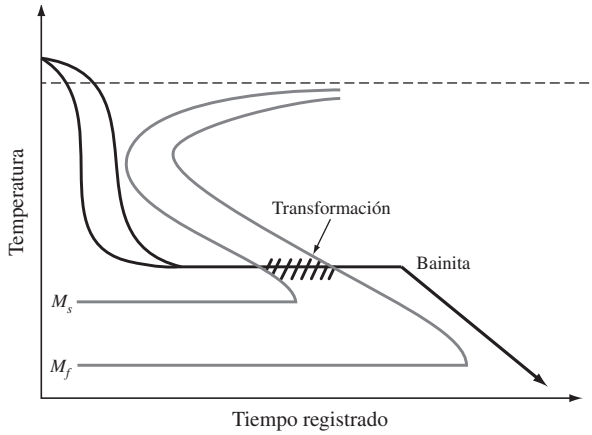


Figura 9.34
Curvas de enfriamiento para el austemperizado de acero al carbono simple eutectoide. La estructura resultante de este tratamiento es la bainita. Una ventaja de este tratamiento térmico es que el revenido es innecesario. Compare esto con el proceso acostumbrado de temple y revenido que se muestra en la figura 9.29. M_s y M_f son el inicio y el final de la transformación martensítica, respectivamente.
(Tomado de "Suiting the Heat Treatment to the Job", United States Steel Corp., 1968, pág. 34.)

mero, después se templa en un baño de sal fundida a una temperatura apenas por arriba de la temperatura M_s del acero, se mantiene en ese estado isotérmicamente para permitir que ocurra la transformación de austenita en bainita, y finalmente se enfría en contacto con el aire hasta alcanzar la temperatura ambiente (figura 9.34). La estructura final de un acero al carbono simple eutectoide sometido a temple isotérmico es la de la *bainita*.

Las ventajas del austemperizado son (1) mejor ductilidad y resistencia al impacto de ciertos aceros sobre los valores que se obtienen mediante el temple y revenido convencionales (tabla 9.2) y (2) menor distorsión del material templado. Las desventajas del austemperizado en comparación con el temple instantáneo y revenido son (1) la necesidad de contar con un baño especial de sal fundida y (2) el hecho de que el proceso sólo puede usarse con un número limitado de aceros.

9.3.6 Clasificación y propiedades mecánicas típicas de aceros al carbono simples

Los aceros al carbono simples se designan más comúnmente con un código de cuatro dígitos AISI-SAE.[6] Los dos primeros dígitos son 10 e indican que se trata de acero al carbono simple. Los dos últimos dígitos indican el contenido de carbono nominal del acero, en centésimas de punto porcentual. Por ejemplo, el número de código AISI-

[6] AISI son las siglas de American Iron and Steel Institute y SAE son las siglas de Society for Automotive Engineers.

SAE aplicado a cierto acero indica que se trata de acero al carbono simple con un contenido nominal de 0.30 por ciento de carbono. Todos los aceros al carbono simples contienen manganeso como un elemento de aleación para aumentar su solidez. El contenido de manganeso en la mayoría de los aceros al carbono simples fluctúa entre 0.30 y 0.95 por ciento. Los aceros al carbono simples contienen también impurezas de azufre, fósforo, silicio y otros elementos.

Las propiedades mecánicas típicas de algunos aceros al carbono simples tipo AISI-SAE son listadas en la tabla 9.3. Los aceros al carbono simples muy bajos en carbono tienen una relativamente baja, pero su ductilidad es muy alta. Se usan para fabricar material en láminas destinadas a aplicaciones tales como salpicaderas y planchas de carrocería para automóviles. A medida que el contenido de carbono aumenta en los aceros al carbono simples, éstos se vuelven más resistentes pero menos dúctiles. Los aceros con contenido mediano de carbono (1020-1040) tienen aplicación en ejes y engranajes. Los aceros altos en carbono (1060-1095) se usan, por ejemplo, en resortes, troqueles, cuchillas y hojas de tijeras.

9.4 ACEROS DE BAJA ALEACIÓN

Los aceros al carbono simples se pueden usar con éxito cuando la solidez y otros requisitos de ingeniería no son demasiado rigurosos. Esos aceros tienen un costo relativamente bajo, pero presentan limitaciones entre ellas las siguientes:

1. Los aceros al carbono simples no pueden reforzarse más allá de 100 000 psi (690 MPa) aproximadamente, sin sufrir una pérdida considerable en su ductilidad y resistencia al impacto.
2. El grosor de los aceros al carbono simples en secciones grandes no se puede mantener de manera homogénea con una estructura martensítica, es decir, sus capas profundas no pueden endurecerse.
3. Los aceros al carbono simples tienen poca resistencia a la corrosión y la oxidación.
4. Los aceros al carbono simples con contenido mediano de carbono deben templarse rápidamente para lograr una estructura totalmente martensítica. El temple rápido conduce a una posible distorsión y agrietamiento de la parte sometida a tratamiento térmico.
5. Los aceros al carbono simples tienen poca resistencia al impacto a bajas temperaturas.

Para superar las deficiencias de los aceros al carbono simples se han creado aceros de aleación que contienen elementos aleados para mejorar sus propiedades. En general, los aceros de aleación cuestan más que los aceros al carbono simples, pero para muchas aplicaciones son los únicos materiales que es posible utilizar para satisfacer las necesidades de ingeniería. Los principales elementos que se agregan para producir aceros de aleación son manganeso, níquel, cromo, molibdeno y tungsteno. Otros elementos que se agregan a veces son vanadio, cobalto, boro, cobre, aluminio, plomo, titanio y columbio (niobio).

9.4.1 Clasificación de aceros de aleación

Éstos pueden contener hasta 50 por ciento de elementos aleados y aún seguirse considerando como aceros aleados. En este libro, los aceros de aleación baja que contienen

Tabla 9.3 Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de los aceros al carbono simples

Aleación número AISI-SAE	Composición química (% en peso)	Estado	Resistencia a la tracción		Límite elástico		Alargamiento (%)	Aplicaciones típicas
			ksi	MPa	ksi	MPa		
1010	0.10 C, 0.40 Mn	Laminado en caliente	40-60	276-414	26-45	179-310	28-47	Lámina y tira para trefilado; alambre, varilla, clavos y tornillos; varilla de refuerzo para concreto
		Laminado en frío	42-58	290-400	23-38	159-262	30-45	
1020	0.20 C, 0.45 Mn	Laminado tosco	65	448	48	331	36	Planchas y secciones estructurales de acero; ejes, engranajes
		Recocido	57	393	43	297	36	
1040	0.40 C, 0.45 Mn	Laminado tosco	90	621	60	414	25	Ejes, pernos, tubos con alta resistencia a la tensión, engranajes
		Recocido	75	517	51	352	30	
		Revenido*	116	800	86	593	20	
1060	0.60 C, 0.65 Mn	Laminado	118	814	70	483	17	Alambre para resortes, troqueles de forjar, ruedas de ferrocarril
		Recocido	91	628	54	483	22	
		Revenido*	160	110	113	780	13	
1080	0.80 C, 0.80 Mn	Laminado tosco	140	967	85	586	12	Cuerdas para instrumentos musicales, resortes helicoidales, cinceles, bloques de troqueles de forjar
		Recocido	89	614	54	373	25	
		Revenido*	189	1 304	142	980	12	
1095	0.95 C, 0.40 Mn	Laminado tosco	140	966	83	573	9	Troqueles, sacabocados, tarrajas, fresas, hojas de tijeras, alambre de gran resistencia a la tracción
		Recocido	95	655	55	379	13	
		Revenido*	183	1 263	118	814	10	

*Templado y revenido a 315°C (600°F).

Tabla 9.4 Principales tipos de acero de aleación estándar

13xx	Manganeso 1.75
40xx	Molibdeno 0.20 o 0.25; o molibdeno 0.25 y azufre 0.042
41xx	Cromo 0.50, 0.80, o 0.95, molibdeno 0.12, 0.20 o 0.30
43xx	Níquel 1.83, cromo 0.50 o 0.80, molibdeno 0.25
44xx	Molibdeno 0.53
46xx	Níquel 0.85 o 1.83, molibdeno 0.20 o 0.25
47xx	Níquel 1.05, cromo 0.45, molibdeno 0.20 o 0.35
48xx	Níquel 3.50, molibdeno 0.25
50xx	Cromo 0.40
51xx	Cromo 0.80, 0.88, 0.93, 0.95 o 1.00
51xxx	Cromo 1.03
52xxx	Cromo 1.45
61xx	Cromo 0.60 o 0.95, vanadio 0.13 o min 0.15
86xx	Níquel 0.55, cromo 0.50, molibdeno 0.20
87xx	Níquel 0.55, cromo 0.50, molibdeno 0.25
88xx	Níquel 0.55, cromo 0.50, molibdeno 0.35
92xx	Silicio 2.00; o silicio 1.40 y cromo 0.70
50Bxx*	Cromo 0.28 o 0.50
51Bxx*	Cromo 0.80
81Bxx*	Níquel 0.30, cromo 0.45, molibdeno 0.12
94Bxx*	Níquel 0.45, cromo 0.40, molibdeno 0.12

*B significa acero al boro.
Fuente: "Alloy Steel: Semifinished; Hot-Rolled and Cold-Finished Bars", American Iron and Steel Institute, 1970.

entre 1 y 4 por ciento de elementos aleados se consideran como aceros de aleación. Esos aceros son principalmente de tipo automotriz y para la construcción, y lo más común es llamarlos simplemente *aceros de aleación*.

En Estados Unidos, los aceros de aleación suelen designarse con el sistema de cuatro dígitos AISI-SAE. Los dos primeros dígitos indican el principal elemento aleado o los grupos de elementos presentes en el acero, y los dos últimos dígitos indican las centésimas del porcentaje de carbono contenido en el acero. La tabla 9.4 enlista la composición nominal de los principales tipos de aceros de aleación estándar.

9.4.2 Distribución de los elementos contenidos en los aceros de aleación

La manera en que los elementos de aleación se distribuyen en los aceros al carbono depende sobre todo de las tendencias de cada elemento a formar compuestos y carburos. En la tabla 9.5 se resume la distribución aproximada de la mayoría de los elementos presentes en los aceros de aleación.

El níquel se disuelve en la ferrita α del acero porque su tendencia a formar carburos es menor que la del hierro. El silicio se combina con el oxígeno del acero hasta cierto punto formando inclusiones no metálicas, pero, por lo demás, se disuelve en la ferrita. La mayor parte del manganeso que se añade a los aceros al carbono se disuelve en la ferrita. Sin embargo, parte del manganeso forma carburos, pero por lo general se incorpora a la cementita como $(Fe,Mn)_3C$.

Tabla 9.5 Distribución aproximada de los elementos presentes en los aceros de aleación*

Elemento	Disuelto en ferrita	Combinado en carburo	Combinado como carburo	Compuesto	Elemental
Níquel	Ni			Ni_3Al	
Silicio	Si			$SiO_2 \cdot M_xO_y$	
Manganeso	Mn ⟷	Mn	$(Fe,Mn)_3C$	MnS; $MnO \cdot SiO_2$	
Cromo	Cr ⟷	Cr	$(Fe,Cr_3)C$ Cr_7C_3 $Cr_{23}C_6$		
Molibdeno	Mo ⟷	Mo	Mo_2C		
Tungsteno	W ⟷	W	W_2C		
Vanadio	V ⟷	V	V_4C_3		
Titanio	Ti ⟷	Ti	TiC		
Columbio†	Cb ⟷	Cb	CbC		
Aluminio	Al			Al_2O_3; AlN	
Cobre	Cu (en pequeña cantidad)				
Plomo					Pb

*Las flechas indican las tendencias relativas de los elementos de la lista a disolverse en ferrita o a combinarse para formar carburos.
†Cb = Nb (niobio).
Fuente: E. C. Bain y H. W. Paxton, "Alloying Elements in Steel", 2a. ed., American Society for Metals, 1966.

El cromo, que tiene una tendencia un poco más fuerte a formar carburos que el hierro, se reparte entre las fases de ferrita y de carburo. La distribución del cromo depende de la cantidad de carbono presente y de la ausencia de otros elementos cuya tendencia a formar carburos es más fuerte, como el titanio y el columbio. El tungsteno y el molibdeno se combinan con el carbono para formar carburos si hay suficiente carbono presente y si no están presentes otros elementos con tendencia más fuerte a formar carburos, como el titanio y el columbio. El vanadio, el titanio y el columbio son elementos con fuerte tendencia a formar carburos y se encuentran en los aceros, principalmente en forma de carburos. El aluminio se combina con oxígeno y nitrógeno para formar los compuestos Al_2O_3 y AlN, respectivamente.

9.4.3 Efectos de los elementos contenidos en una aleación sobre la temperatura eutectoide de los aceros

Los diversos elementos de contenidos en una aleación hacen que la temperatura eutectoide del diagrama de fases Fe-Fe_3C aumente o disminuya (figura 9.35). Tanto el manganeso como el níquel hacen que la temperatura eutectoide disminuya y actúan como *elementos estabilizadores de austenita* que agrandan la región austenítica del diagrama de fases Fe-Fe_3C (figura 9.6). En algunos aceros con suficientes cantidades de níquel o manganeso, la estructura austenítica puede obtenerse a temperatura ambiente. Los elementos formadores de carburo, como el tungsteno, el molibdeno y el titanio, elevan la temperatura eutectoide del diagrama de fases Fe-Fe_3C a valores más altos y reducen el campo de la fase austenítica. Dichos elementos reciben el nombre de *elementos estabilizadores de ferrita*.

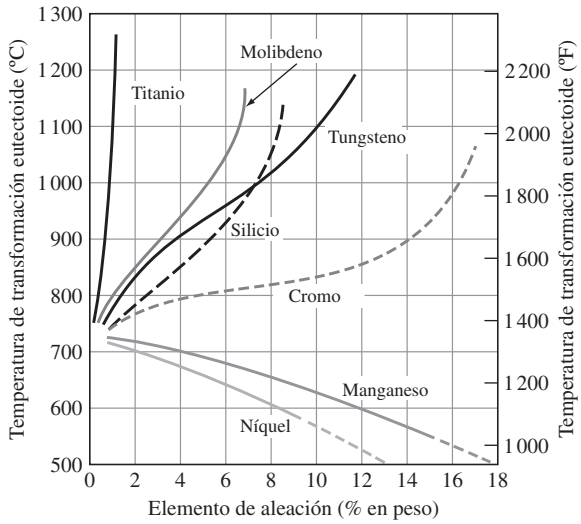


Figura 9.35
Efecto del porcentaje de elementos de aleación sobre la temperatura eutectoide de la transformación de austenita a perlita en el diagrama de fases Fe-Fe_3C.
(Según "Metals Handbook", vol. 8, 9a. ed., American Society for Metals, 1973, pág. 191.)

9.4.4 Templabilidad

La **templabilidad** de un acero se define como la propiedad que determina la profundidad y distribución de la dureza inducida mediante el templado a partir de la condición austenítica. La templabilidad de un acero depende principalmente de (1) su composición, (2) el tamaño del grano austenítico y (3) la estructura del acero antes de ser templado. La templabilidad no debe confundirse con la *dureza* de un acero, que es su resistencia a la deformación plástica, generalmente por indentación o melladura.

En la industria, la manera más común de medir la templabilidad es la **prueba de templabilidad de Jominy**. En la prueba del templado final de Jominy, el espécimen es una barra cilíndrica de 1 pulg de diámetro y 4 pulg de largo, con un reborde de $\frac{1}{16}$ pulg en un extremo (figura 9.36*a*). Debido a que la estructura previa tiene un fuerte efecto en la templabilidad, el espécimen suele normalizarse antes de la prueba. En la prueba de Jominy, una vez que la muestra ha sido austenitizada, se coloca en un portapiezas, como se muestra en la figura 9.36*b*, y se lanza rápidamente un chorro de agua sobre un extremo del espécimen. Después del enfriamiento, dos superficies planas paralelas son pulidas en los extremos opuestos de la barra de prueba y se realizan mediciones de dureza Rockwell C a lo largo de esas superficies hasta 2.5 pulg del extremo templado.

En la figura 9.37 se muestra una gráfica de templabilidad de dureza Rockwell C *versus* distancia del extremo templado, para un acero al carbono simple eutectoide 1080. Este acero tiene templabilidad relativamente baja porque su dureza disminuye

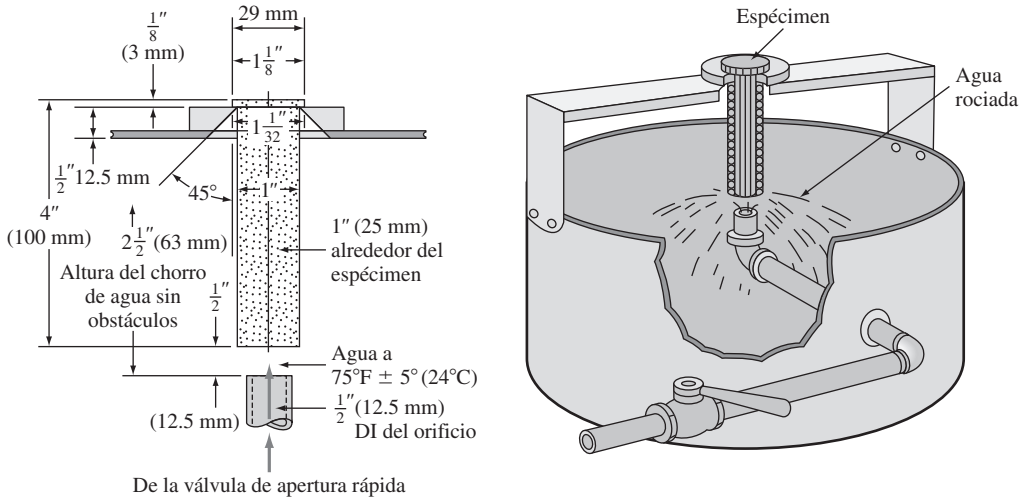


Figura 9.36

a) Espécimen y portapiezas para la prueba de templabilidad del extremo templado.
(Según M. A. Grossmann y E. C. Bain, "Principles of Heat Treatment", 5a. ed., American Society for Metals, 1964, pág. 114.)

b) Ilustración esquemática de la prueba del extremo templado para determinar la templabilidad.
[Según H. E. McGannon, (ed.), "The Making, Shaping, and Treating of Steel", 9a. ed., United States Steel Corp., 1971, pág. 1099.]

desde un valor de RC = 65 en el extremo templado de la barra de Jominy a RC = 50 a sólo $\frac{3}{16}$ pulg de dicho extremo. Por tanto, las secciones gruesas de este acero no pueden hacerse totalmente martensíticas mediante el templado. La figura 9.37 correlaciona los datos de templabilidad en el extremo templado con el diagrama de transformación continua correspondiente al acero 1080 e indica los cambios microestructurales que ocurren a lo largo de la barra a cuatro distancias, *A*, *B*, *C* y *D* del extremo templado.

Las curvas de templabilidad correspondientes a algunos aceros de aleación con 0.40% C se muestran en la figura 9.38. El acero de aleación 4340 tiene una templabilidad excepcionalmente alta y puede templarse hasta una dureza de RC = 40 a 2 pulg del extremo templado de una barra de Jominy. Por tanto, los aceros de aleación pueden templarse a un ritmo más lento sin que pierdan sus valores de templabilidad relativamente altos.

Los aceros de aleación como el acero 4340 son muy templables porque, al ser enfriados a partir de la región austenítica, la descomposición de austenita en ferrita y bainita se retrasa y la descomposición de la austenita en martensita puede lograrse a tasas más lentas. Este retraso de la descomposición de austenita en ferrita más bainita se muestra cuantitativamente en el diagrama de transformación de enfriamiento continuo de la figura 9.39.

Para la mayoría de los aceros al carbono y los de baja aleación, un templado estándar produce, en la misma posición de corte transversal, velocidades de enfriamien-

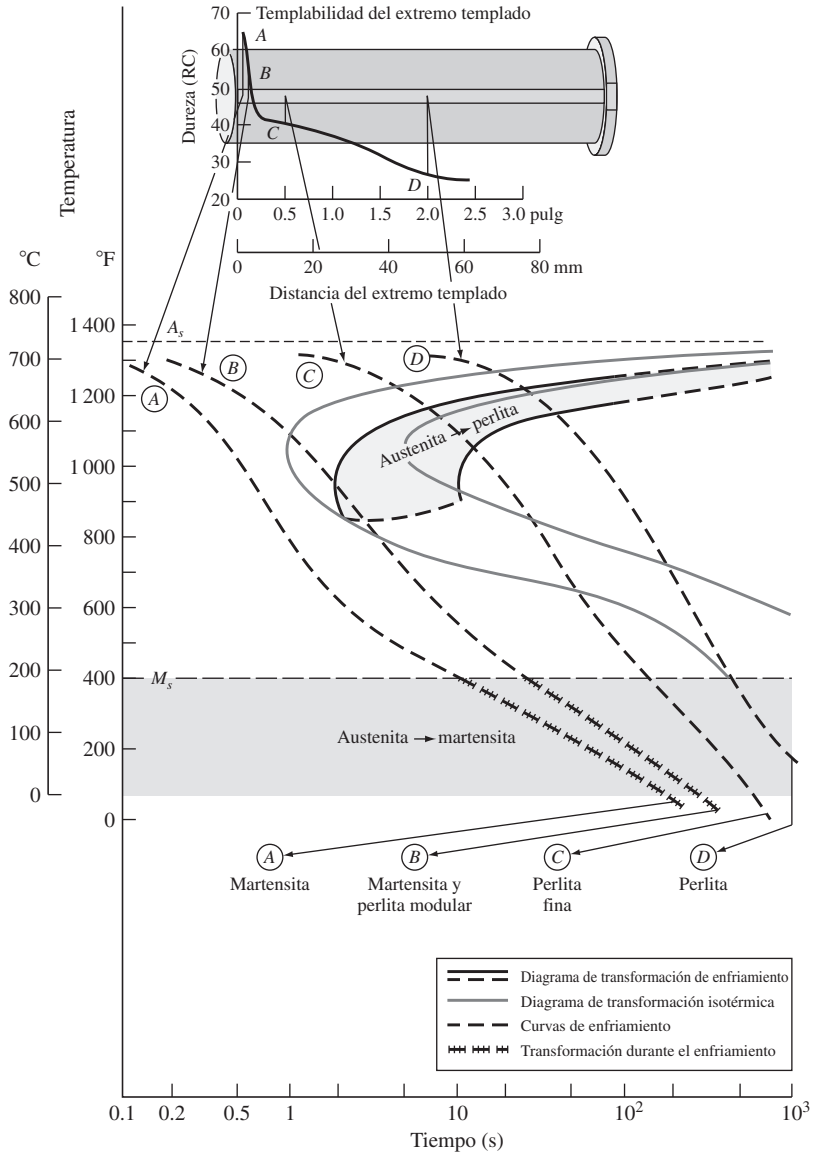


Figura 9.37
Correlación del diagrama de transformación por enfriamiento continuo y los datos de la prueba de la capacidad de endurecimiento de extremo templado para acero al carbono eutectoide.
(Según "Isothermal Transformation Diagrams", United States Steel Corp., 1963, pág. 181.)

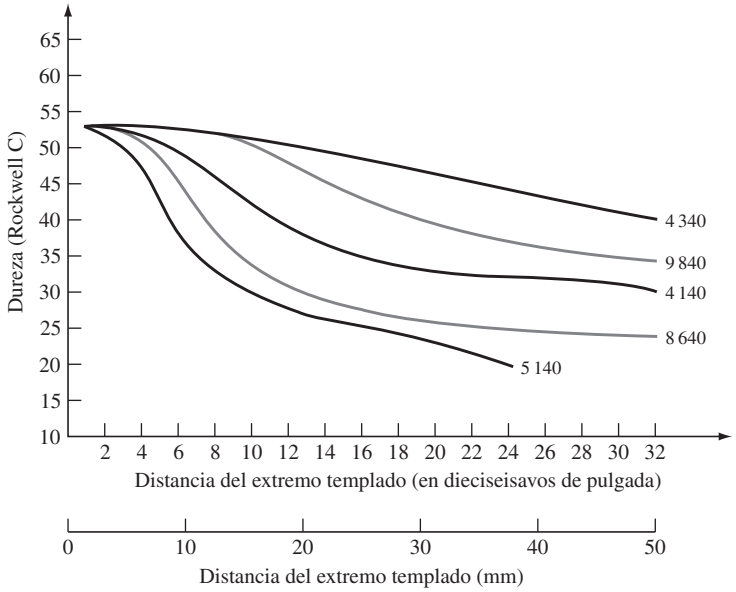


Figura 9.38
Curvas de templabilidad comparativa de aceros de aleación con 0.40% C.
[Según H. E. McGannon (ed.), "The Making, Shaping, and Treating of Steels", United States Steel Corp., 1971, pág. 1139.]

to comunes sobre toda la longitud de barras de acero largas y redondas del mismo diámetro. Las velocidades de enfriamiento varían (1) para los diferentes diámetros de la barra, (2) para las diferentes posiciones en los cortes transversales de las barras y (3) para los diferentes medios de templado. La figura 9.40 muestra curvas del diámetro de la barra *versus* la velocidad de enfriamiento en diferentes lugares en el interior del corte transversal de las barras de acero, utilizando templados de agua agitada en aceite agitado. Esas gráficas se pueden usar para determinar la velocidad de enfriamiento y la distancia asociada del extremo templado de una barra Jominy con temple estándar, para un diámetro de barra seleccionado, en un lugar determinado del corte transversal de la barra, usando un medio de templado específico. Esas velocidades de enfriamiento y sus distancias asociadas del extremo de barras Jominy templadas se pueden usar con gráficas de Jominy de la dureza superficial *versus* la distancia del extremo templado, en aceros específicos, para determinar la dureza de un acero en particular en un lugar específico del corte transversal de la barra de acero de que se trate. En el problema de ejemplo 9.5 se muestra cómo pueden usarse las gráficas de la figura 9.40 para predecir la dureza de una barra de acero de diámetro determinado, en un lugar específico de su corte transversal, templado en un medio dado. Se debe señalar que las gráficas de la dureza de Jominy *versus* la distancia del extremo templado suelen dibujarse como bandas de datos, en lugar de líneas, de manera que las durezas que se obtienen a partir de esas curvas corresponden en realidad a sus valores en el centro de un rango de valores.

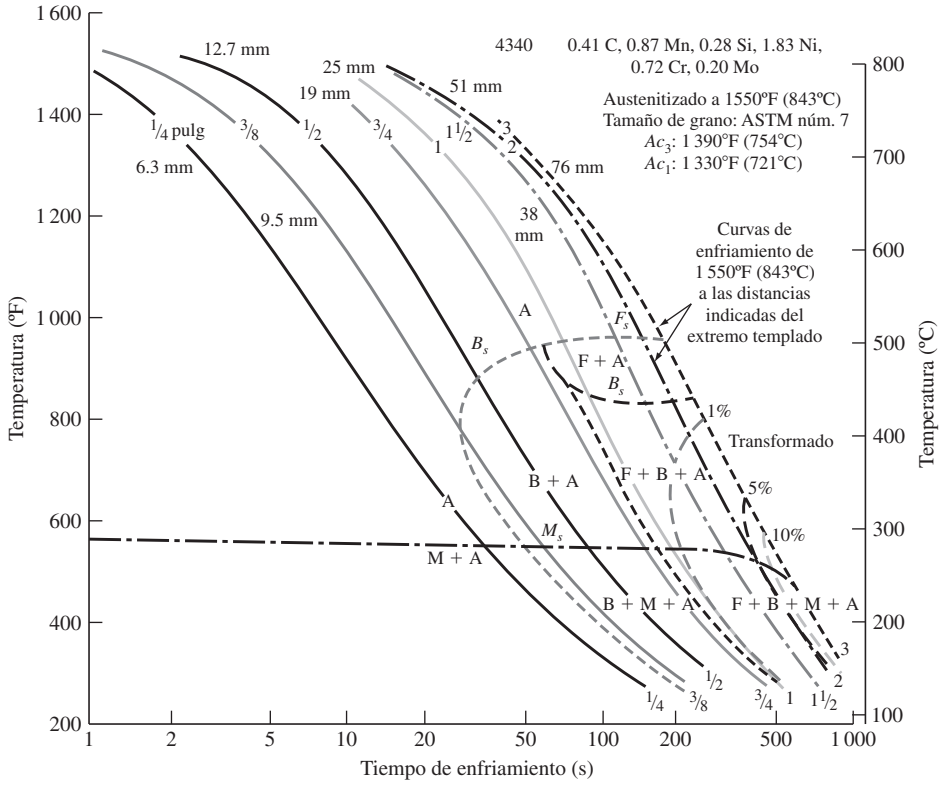


Figura 9.39
Diagrama de transformación por enfriamiento continuo para acero de aleación AISI 4340. A = austenita, F = ferrita, B = bainita, M = martensita.
(Según Metal Progress, septiembre de 1964, pág. 106.)

PROBLEMA DE EJEMPLO 9.5

Una barra de acero de aleación 5140 austenitizado, de 40 mm de diámetro, se templa en aceite agitado. Prediga cuál será la dureza Rockwell C (RC) de esta barra *a*) en su superficie y *b*) en su centro.

■ **Solución**

a) En la superficie de la barra. La tasa de enfriamiento en la superficie de la barra de acero de 40 mm templada en aceite agitado, según se aprecia en la parte ii) de la figura 9.40, es comparable a la velocidad de enfriamiento a 8 mm del extremo de una barra Jominy templada estándar. Si se observa la figura 9.38 a 8 mm del extremo templado de la barra Jominy y la curva para el acero 5140 se ve que la dureza de la barra debe ser de aproximadamente 45 RC.

b) En el centro de la barra. Según se aprecia en la parte ii) de la figura 9.40, la tasa de enfriamiento en el centro de la barra de 40 mm de diámetro templada en aceite está relacionada con un punto situado a 13 mm del extremo de una barra Jominy templada. La dureza correspondiente a esa distancia del extremo de una barra Jominy templada para la aleación 5140 es de casi 32 RC, según se aprecia en la figura 9.38.

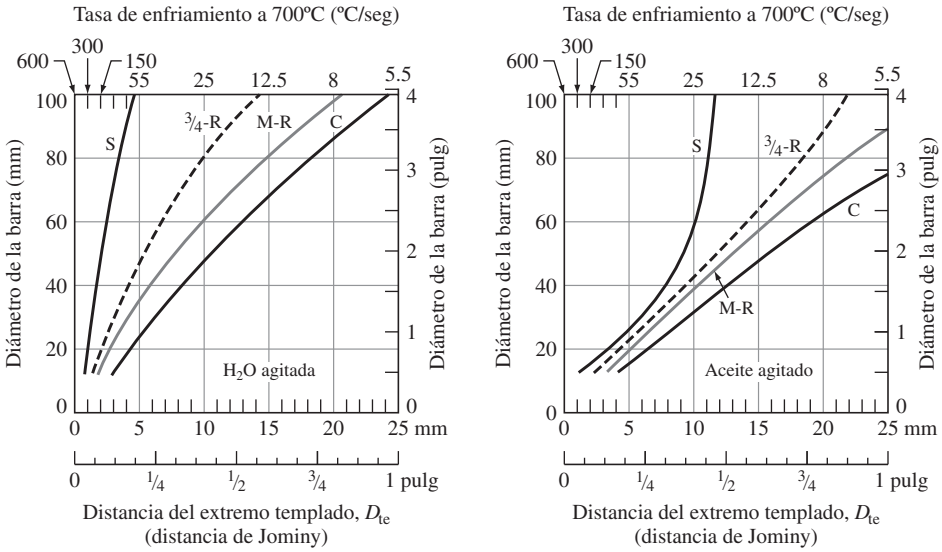


Figura 9.40
Velocidades de enfriamiento en barras de acero redondas y largas templadas en (i) agua agitada y (ii) aceite agitado. Abscisa superior, velocidades de enfriamiento a 700°C; abscisa inferior, posiciones equivalentes en una barra de prueba con el extremo templado. (C = centro, M-R = radio medio, S = superficie, línea interrumpida = curva aproximada para posiciones a $\frac{3}{4}$ de radio sobre el corte transversal de la barras.)
(Según L. H. Van Vlack, "Materials for Engineering: Concepts and Applications", Addison-Wesley, 1982, pág. 155.)

9.4.5 Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de aceros de baja aleación

En la tabla 9.6 se enlistan algunas propiedades mecánicas de tensión y aplicaciones típicas de algunos aceros de baja aleación de uso común. Para algunos niveles de resistencia, ciertos aceros de baja aleación ofrecen una mejor combinación de resistencia, dureza y ductilidad que los aceros al carbono simples. Sin embargo, los aceros de baja aleación cuestan más y sólo se usan cuando son indispensables. Los aceros de baja aleación son utilizados con mayor intensidad en la fabricación de automóviles y camiones, en partes que exigen propiedades superiores de resistencia y tenacidad que no pueden obtenerse con los aceros al carbono simples. Algunas aplicaciones típicas de los aceros de baja aleación en automóviles son flechas, ejes, engranes y resortes. Los aceros de baja aleación que contienen 0.2% C suelen ser carburizados o su superficie se trata térmicamente para obtener una superficie dura, resistente al desgaste, sin dejar de tener un núcleo interno tenaz.

9.5 ALEACIONES DE ALUMINIO

Antes de analizar algunos de los aspectos importantes de la estructura, propiedades y aplicaciones de las aleaciones de aluminio, se examina el proceso de precipitación-reforzamiento (endurecimiento) que se utiliza para aumentar la resistencia de muchas aleaciones de aluminio y de otros metales.

Tabla 9.6 Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de los aceros de baja aleación

Aleación número ANSI-SAE	Composición química (% en peso)	Estado	Resistencia a la tracción ksi	Resistencia a la tracción MPa	Límite elástico ksi	Límite elástico MPa	Alargamiento (%)	Aplicaciones típicas
Aceros al manganeso								
1340	0.40 C, 1.75 Mn	Recocido	102	704	63	435	20	Pernos de alta resistencia
		Revenido*	230	1 587	206	1 421	12	
Aceros al cromo								
5140	0.40 C, 0.80 Cr, 0.80 Mn	Recocido	83	573	43	297	29	Engranaje de transmisión para automóviles
		Revenido*	229	1 580	210	1 449	10	
5160	0.60 C, 0.80 Cr, 0.90 Mn	Recocido	105	725	40	276	17	Amortiguadores de resorte y de láminas flexibles para automóvil
		Revenido*	290	2 000	257	1 773	9	
Aceros al cromo-molibdeno								
4140	0.40 C, 1.0 Cr, 0.9 Mn, 0.20 Mo	Recocido	95	655	61	421	26	Engranajes de motores de turbina de gas para aviones y transmisiones
		Revenido*	225	1550	208	1 433	9	
Aceros al níquel-molibdeno								
4620	0.20 C, 1.83 Ni, 0.55 Mn, 0.25 Mo	Recocido	75	517	54	373	31	Engranajes de transmisión, pasadores de cadena, ejes, rodamientos de rodillos
		Normalizado	83	573	53	366	29	
4820	0.20 C, 3.50 Ni, 0.60 Mn, 0.25 Mo	Recocido	99	683	67	462	22	Engranajes para equipo siderúrgico, maquinaria para papel, maquinaria de minería, equipo para movimiento de tierra
		Normalizado	100	690	70	483	60	
Aceros al níquel (1.83%)-cromo-molibdeno								
4340 (E)	0.40 C, 1.83 Ni, 0.90 Mn, 0.80 Cr, 0.20 Mo	Recocido	108	745	68	469	22	Secciones pesadas, trenes de aterrizaje, partes de camión
		Revenido*	250	1 725	230	1 587	10	
Aceros al níquel (0.55%)-cromo-molibdeno								
8620	0.20 C, 0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.80 Mn, 0.20 Mo	Recocido	77	531	59	407	31	Engranajes de transmisión
		Normalizado	92	635	52	359	26	
8650	0.50 C, 0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.80 Mn, 0.20 Mo	Recocido	103	710	56	386	22	Ejes y flechas de máquinas pequeñas
		Revenido*	250	1 725	225	1 552	10	

*Revenido a 600°F (315°C).

9.5.1 Endurecimiento por precipitación (endurecimiento)

Endurecimiento por precipitación de una aleación binaria generalizada El propósito del endurecimiento por precipitación es el de crear en una aleación tratada con calor, una dispersión densa y fina de partículas precipitadas en una matriz de metal deformable. Las partículas precipitadas actúan como obstáculos que se oponen al movimiento de dislocación y, por lo tanto, fortalecen la aleación sometida a tratamiento térmico.

El proceso de precipitación-endurecimiento se puede explicar en términos generales con referencia al diagrama de fases binario de los metales A y B que se muestra en la figura 9.41. Para que un sistema de aleación pueda reforzarse por precipitación para ciertas composiciones de la aleación, tiene que existir una solución sólida terminal cuya solubilidad sólida disminuya a medida que baja la temperatura. En el diagrama de fases de la figura 9.41 se muestra este tipo de decremento de la solubilidad sólida en la solución sólida terminal α al pasar del punto a al punto b, a lo largo de la línea de solvatación (solvus) indicada.

Se considerará ahora el endurecimiento por precipitación de una aleación de composición x_1 en el diagrama de fases de la figura 9.41. Se eligió la composición x_1 para la aleación porque en ella existe un gran decremento de la solubilidad de los sólidos en la solución sólida α a medida que la temperatura baja de T_2 a T_3. El proceso de endurecimiento por precipitación incluye los tres pasos básicos siguientes:

1. El *tratamiento calórico de la solución es el primer paso* del proceso de endurecimiento por precipitación. A veces este tratamiento recibe el nombre de *solucionizado*. La muestra de aleación, que puede presentarse en forma de forja o fundida, se calienta a una temperatura intermedia entre la del solvus y la del solidus, y se mantiene ahí hasta que se produce una estructura de solución sólida uniforme. La temperatura T_1 en el punto c de la figura 9.41 se seleccionó para nuestra aleación

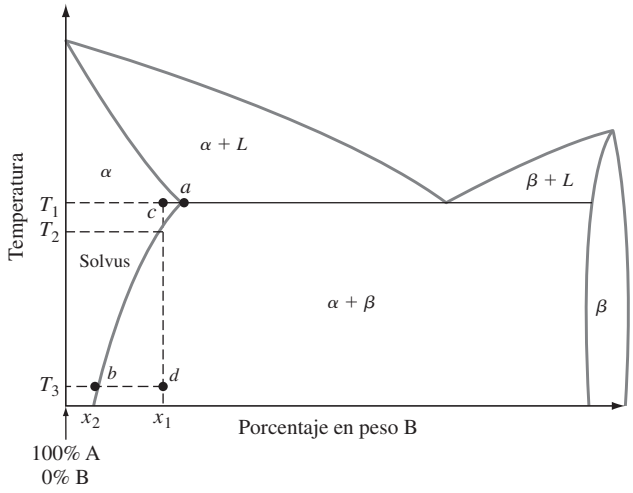


Figura 9.41
Diagrama de fases binario para dos metales A y B que tienen una solución sólida terminal α que tiene una solubilidad sólida decreciente de B en A conforme baja la temperatura.

x_1 porque está en el punto medio entre los límites de las fases solvus y solidus de la solución sólida α.

2. El *templado* es el *segundo paso* del proceso del endurecimiento por precipitación. La muestra es enfriada rápidamente a una temperatura más baja, generalmente la temperatura ambiente, y el medio de enfriamiento suele ser agua a temperatura ambiente. La estructura de la muestra de aleación después del templado en agua consiste en una solución sólida sobresaturada. Por lo tanto, la estructura de nuestra aleación x_1 después del templado a la temperatura T_3 en el punto *d* de la figura 9.41 corresponde a una solución sólida sobresaturada de la fase α.

3. El *envejecimiento es el tercer paso básico* del proceso de endurecimiento por precipitación. Es necesario envejecer la solución tratada térmicamente y templada de la muestra de aleación para que se forme un precipitado finamente disperso. La formación de dicho precipitado en la aleación es el objetivo del proceso de endurecimiento por precipitación. El precipitado fino dentro de la aleación impide el movimiento de las dislocaciones durante la deformación, porque las dislocaciones son obligadas a cruzar transversalmente las partículas precipitadas o a rodearlas. Al restringir el movimiento de las dislocaciones durante la deformación, la aleación se refuerza.

Cuando la aleación se deja envejecer a temperatura ambiente, el proceso se llama *envejecimiento natural*, mientras que cuando dicho proceso se realiza a altas temperaturas se denomina *envejecimiento artificial*. La mayoría de las aleaciones requieren un envejecimiento artificial, y la temperatura de envejecimiento suele oscilar entre 15 y 25 por ciento de la diferencia de temperatura entre la temperatura ambiente y la del tratamiento térmico de la solución.

Productos de descomposición creados por el envejecimiento de la solución sólida supersaturada Una aleación susceptible de ser endurecida por precipitación en la condición de solución sólida sobresaturada está en un estado energético alto, según se indica esquemáticamente con el nivel energético 4 de la figura 9.42. Este estado energético es relativamente inestable y la aleación tiende a buscar un estado energético más bajo mediante la descomposición espontánea de la solución sólida sobresaturada en fases metaestables o en la fase de equilibrio. La fuerza que causa la precipitación de las fases metaestables o de la fase de equilibrio es la disminución de la energía del sistema cuando se forman dichas fases.

Cuando la solución sólida sobresaturada de la aleación susceptible de ser endurecida por precipitación es envejecida a una temperatura relativamente baja, en la que sólo se dispone de una pequeña cantidad de energía de activación, se forman agrupaciones de átomos segregados conocidas como *zonas de precipitación*, o *zonas GP*.[7] En el caso de nuestra aleación A-B de la figura 9.41, las zonas serán regiones enriquecidas con átomos B en una matriz formada principalmente por átomos A. La formación de esas zonas en la solución sólida sobresaturada se indica mediante el dibujo encerrado en un círculo que aparece en el nivel 3 de energía baja de la figura 9.42. Con mayor envejecimiento y si se dispone de suficiente energía de activación (como resultado de que la temperatura de envejecimiento haya sido suficientemente alta), las zonas se desarrollan en el interior o son sustituidas por un precipitado metaestable intermedio más grueso (de mayor tamaño), lo cual se indica en el dibujo circular colocado

[7] A veces a las zonas de precipitación se les llama zonas GP, en conmemoración de los dos científicos de antaño, Guinier y Preston, que identificaron por primera vez esas estructuras mediante análisis de difracción con rayos X.

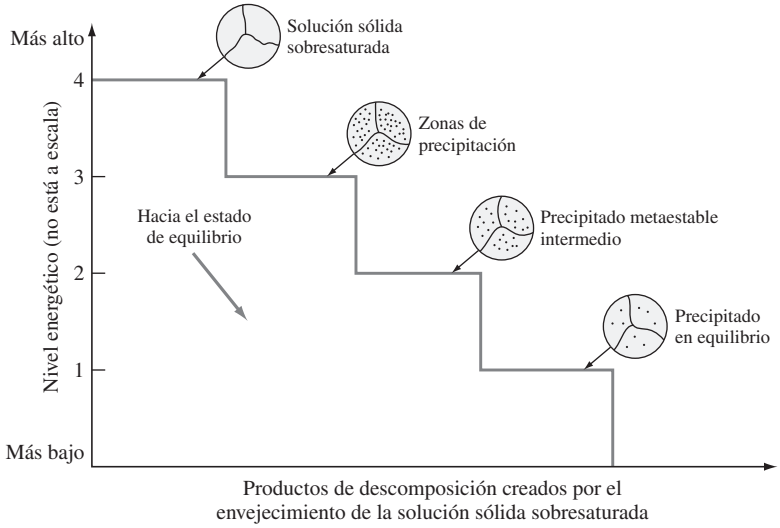


Figura 9.42
Productos de la descomposición creados por el envejecimiento de una solución sólida sobresaturada de una aleación susceptible de ser templada por precipitación. El nivel de energía más alto corresponde a la solución sólida sobresaturada y el nivel de energía más baja es el del precipitado en equilibrio. La aleación puede pasar espontáneamente de un nivel energético alto a otro bajo si existe suficiente energía de activación para la transformación y si las condiciones cinéticas son favorables.

en el nivel energético 2, aún más bajo. Por último, si el envejecimiento continúa (lo cual suele necesitar una temperatura más alta) y si hay suficiente energía de actividad disponible, el precipitado intermedio es reemplazado por el precipitado de equilibrio indicado en el nivel 1, de energía todavía más baja, de la figura 9.42.

Efecto del tiempo de envejecimiento sobre la solidez y dureza de una aleación susceptible de ser templada por precipitación que ha sido termotratada y templada en solución El efecto del envejecimiento sobre el endurecimiento de una aleación susceptible de ser endurecida por precipitación, que ha sido termotratada y templada en solución, se representa en general con una *curva de envejecimiento*. La curva de envejecimiento es una gráfica de resistencia o dureza *versus* tiempo de envejecimiento (usualmente en una escala logarítmica) a una temperatura particular. En la figura 9.43 se muestra una curva de envejecimiento esquemática. En el tiempo cero, la resistencia de la solución sólida sobresaturada se indica en la gráfica sobre el eje de las ordenadas. Conforme aumenta el tiempo de envejecimiento se forman zonas de precipitación y su tamaño aumenta, con lo cual la aleación se vuelve más resistente, más dura y menos dúctil (figura 9.43). La resistencia máxima (condición óptima de envejecimiento) se logra si la temperatura de envejecimiento es suficientemente alta, lo cual suele estar asociado con la formación de un precipitado metaestable intermedio. Si el envejecimiento continúa, de manera que el precipitado intermedio se colapsa y aumenta de volumen, la aleación envejece demasiado y se vuelve más débil que con respecto a la condición óptima de envejecimiento (figura 9.43).

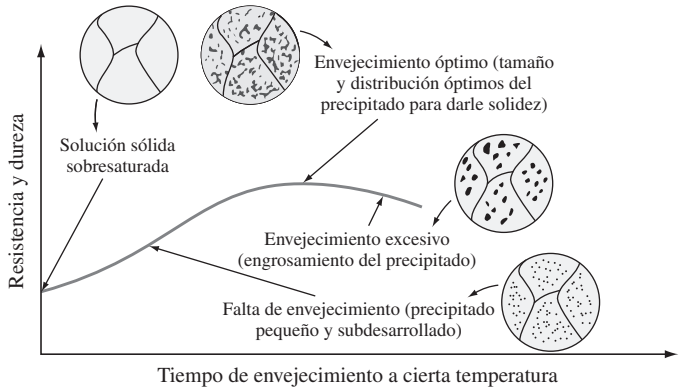


Figura 9.43
Curva esquemática de envejecimiento (resistencia o dureza *versus* tiempo) a una temperatura particular para una aleación que se puede endurecer por precipitación.

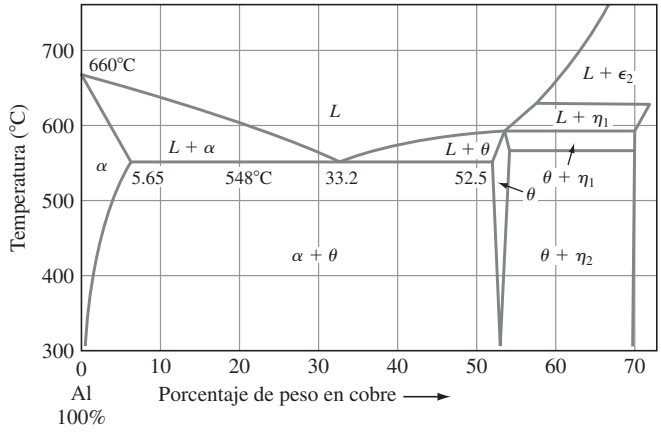


Figura 9.44
Extremo rico en aluminio del diagrama de fases de aluminio-cobre.
[Según K. R. Van Horn (ed.), "Aluminum", vol. 1, American Society for Metals, 1967, pág. 372.]

Ice Nine

Fortalecimiento por precipitación (fortalecimiento) de una aleación Al-4% Cu
Examinemos ahora los cambios de estructura y dureza que ocurren durante el tratamiento térmico por precipitación de una aleación de aluminio-4% cobre. La secuencia del tratamiento térmico para el endurecimiento de esta aleación por precipitación es:

1. Tratamiento térmico de la solución: la aleación Al-4% se convierte en una solución a 515°C aproximadamente (véase el diagrama de fases Al-Cu de la figura 9.44).

2. Templado: la aleación solución tratada térmicamente se enfría rápidamente con agua hasta alcanzar la temperatura ambiente.

3. Envejecimiento: la aleación después del tratamiento térmico de la solución y el templado es envejecida artificialmente en el rango de 130 a 190°C.

Estructuras que se forman durante el envejecimiento de la aleación de Al-4% Cu
En el endurecimiento por precipitación de las aleaciones de Al-4% Cu, pueden identificarse cinco estructuras secuenciales: (1) solución sólida α sobresaturada, (2) zonas GP1, (3) zonas GP2 (también llamadas fase θ''), (4) fase θ' y (5) fase θ, $CuAl_2$. No todas esas fases pueden producirse a todas las temperaturas de envejecimiento. Las zonas GP1 y GP2 se producen a temperaturas de envejecimiento más bajas y las fases θ' y θ ocurren a temperaturas más altas.

Zonas GP1. Estas zonas de precipitación se forman a temperaturas de envejecimiento más bajas y las crean los átomos de cobre que se segregan en la solución sólida α sobresaturada. Las zonas GP1 consisten en regiones segregadas en forma de discos cuyo grosor es de unos cuantos átomos (de 0.4 a 0.6 nm) y cuyo diámetro es de 8 a 10 nm aproximadamente, y se forman en los {100} planos cúbicos de la matriz. Como los átomos de cobre tienen un diámetro aproximadamente 11 por ciento menor que los de aluminio, la celda de la matriz en torno a las zonas se deforma tetragonalmente. Se dice que las zonas GP1 son *coherentes* con la celda de la matriz porque los átomos de cobre reemplazan simplemente a los átomos de aluminio en dicha celda (figura 9.45). Las zonas GP1 son detectables en el microscopio electrónico por los campos de deformación que crean (figura 9.46*a*).

Zonas GP2 (fase θ''). Estas zonas tienen también una estructura tetragonal y son coherentes con el {100} de la matriz de la aleación de Al-4% Cu. Su tamaño fluctúa entre aproximadamente 1 a 4 nm de grosor y de 10 a 100 nm de diámetro, según avance el envejecimiento (figura 9.46*b*).

Fase θ'. Esta fase nuclea de manera heterogénea, sobre todo en las dislocaciones, y es incoherente con la matriz. (Un *precipitado incoherente* es aquel en el cual la partícula precipitada tiene una estructura cristalina distintiva, diferente de la matriz [figura 9.45*a*).] La fase θ' tiene una estructura tetragonal con un grosor de 10 a 150 nm (figura 9.46*c*).

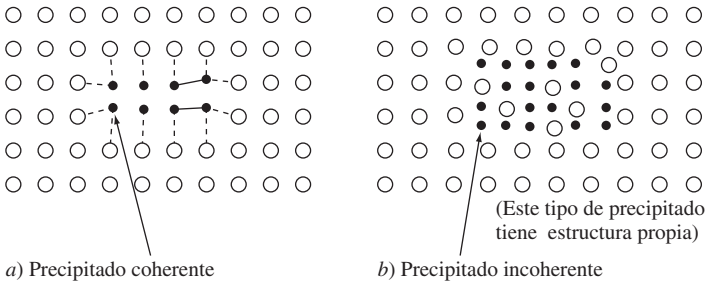
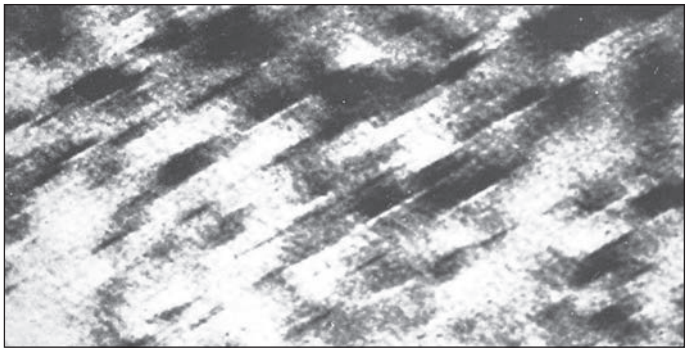
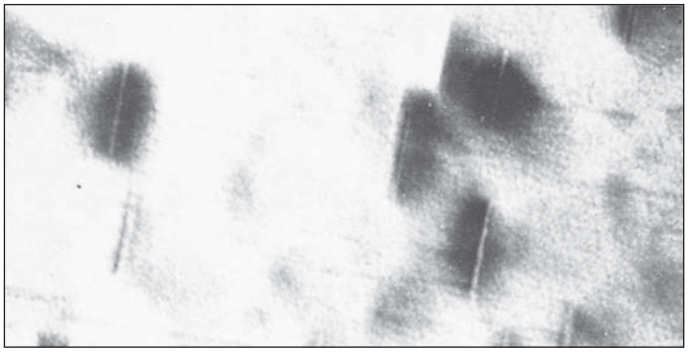


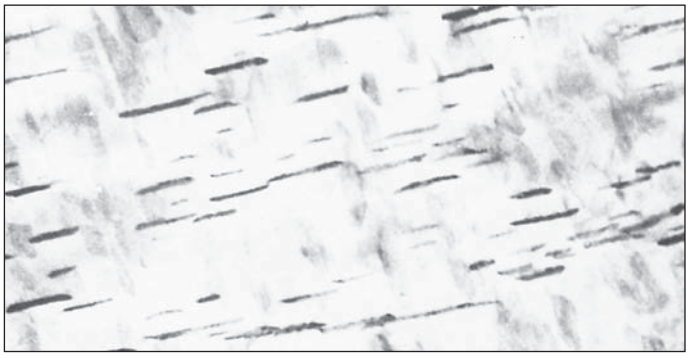
Figura 9.45
Comparación esquemática de la naturaleza de *a*) un precipitado coherente y *b*) un precipitado incoherente. El precipitado coherente está asociado a alta energía de deformación y baja energía superficial, mientras que el incoherente se asocia a baja energía de deformación y alta energía superficial.



a)



b)



c)

Figura 9.46
Microestructuras de aleaciones de Al-4% Cu envejecidas. *a*) Al-4% Cu, calentada a 540°C, templada en agua y envejecida 16 h a 130°C. Se han formado las zonas GP como discos paralelos a los planos {100} de la matriz FCC y en esta etapa tienen un grosor de unos cuantos átomos y un diámetro de 100 A aproximadamente. Sólo los discos que se encuentran en una orientación cristalográfica son visibles. (Micrografía electrónica; amplificación 1 000 000×.) *b*) Al-4% Cu, tratada en solución a 540°C, templada en agua y envejecida durante 1 día a 130°C. Esta micrografía de una lámina delgada muestra campos de tensión debidos a las zonas coherentes GP2. Las regiones oscuras que rodean a las zonas son causadas por los campos de tensión. (Micrografía electrónica; amplificación 800 000×) *c*) Aleación Al-4% Cu tratada en solución a 540°C, templada en agua, y envejecida durante 3 días a 200°C. Esta micrografía de capa delgada muestra la fase incoherente y metaestable θ' que se forma por nucleación heterogénea y crecimiento. (Micrografía electrónica; amplificación 25 000×.)
(Según J. Nutting y R. G. Baker, "The Microstructure of Metals", Institute of Metals, 1965, págs. 65 y 67.)

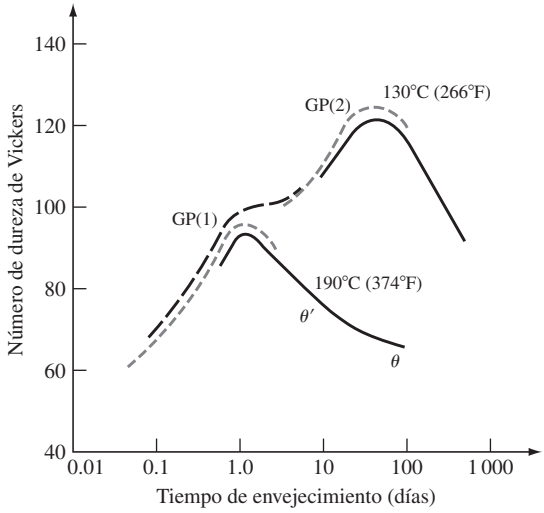


Figura 9.47
Correlación entre las estructuras y la dureza de una aleación de Al-4% Cu envejecida a 130 y 190°C.
[Según J. M. Silcock, T. J. Heal y H. K. Hardy tal como se presenta en K. R. Van Horn (ed.), "Aluminum", vol. 1, American Society for Metals, 1967, pág. 123.]

Fase θ. La fase de equilibrio θ es incoherente y tiene la composición $CuAl_2$. Esta fase tiene una estructura BCT ($a = 0.607$ nm y $c = 0.487$ nm) y se forma a partir de θ' o directamente desde la matriz.

La secuencia general de precipitación en aleaciones de aluminio-cobre binarias puede representarse así

Solución sólida sobresaturada $\rightarrow$ zonas GP1 $\rightarrow$
zonas GP2 (fase θ'') $\rightarrow \theta' \rightarrow \theta$ ($CuAl_2$)

Correlación entre estructuras y dureza en una aleación Al-4% Cu Las curvas de dureza *versus* tiempo de envejecimiento para una aleación Al-4% Cu envejecida a 130 y 190°C se muestran en la figura 9.47. A 130°C se forman zonas GP1 y la dureza de la aleación se incrementa porque el movimiento de dislocación está impedido. Si el envejecimiento continúa a 130°C se crean zonas GP2 que incrementan aún más la dureza al hacer que el movimiento de dislocación sea todavía más difícil. La dureza máxima se alcanza con un tiempo de envejecimiento aún mayor a 130°C cuando se forma θ'. El envejecimiento más allá del máximo de dureza disuelve las zonas GP2 y engrosa la fase θ', provocando una disminución de la dureza de la aleación. Durante el envejecimiento a 190°C no se forman zonas GP1 en la aleación Al-4% Cu porque esta temperatura es superior al solvus GP1. Con largos tiempos de envejecimiento a 190°C se forma la fase θ de equilibrio.

PROBLEMA DE EJEMPLO 9.6

Calcule el porcentaje teórico en peso de la fase θ que se podría formar a 27°C (temperatura ambiente) cuando una muestra de aleación Al-4.50% en peso se enfría muy lentamente a partir de 548°C. Suponga que la solubilidad de sólidos del Cu en Al a 27°C es 0.02% en peso y que la fase θ contiene 54.0% en peso de Cu.

■ Solución

Primero se dibuja una línea de conexión *xy* en el diagrama de fases Al-Cu a 27°C entre las fases α y θ, como se muestra en la figura PE9.5*a*. A continuación, se indica el punto en que la composición tiene 4.5% de Cu en *z*. La relación *xz* dividida entre la línea de conexión completa *xy* (figura PE9.5*b*) da la fracción en peso de la fase θ. Así,

$$\%\text{ en peso} = \frac{4.50 - 0.02}{54.0 - 0.02}(100\%) = \frac{4.48}{53.98}(100\%) = 8.3\% \blacktriangleleft$$

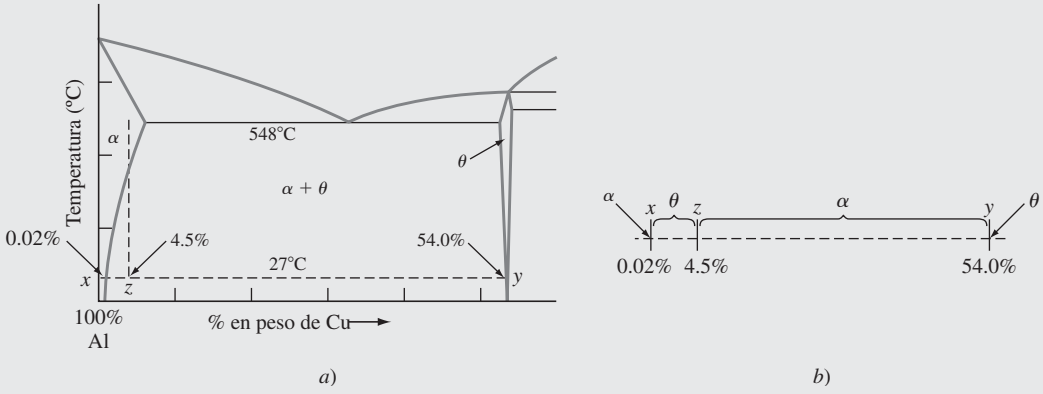


Figura PE9.5
a) Diagrama de fases de Al-Cu con la línea de conexión *xy* indicada en 27°C y el punto *z* localizado a 4.5% Cu. *b*) Línea de conexión aislada *xy* donde se indica el segmento *xz* como representativo de la fracción en peso de la fase θ.

9.5.2 Propiedades generales del aluminio y su producción

Propiedades ingenieriles del aluminio El aluminio tiene una combinación de propiedades que lo hacen sumamente útil como material de ingeniería. El aluminio tiene una densidad baja (2.70 g/cm^3), que lo hace particularmente útil para productos manufacturados para el transporte. El aluminio tiene también buena resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes naturales, debido a la película de óxido tenaz que se forma en su superficie. Aunque el aluminio puro solidez tiene baja resistencia, mediante sus aleaciones puede adquirir una resistencia aproximada de 100 ksi (690 MPa). El aluminio no es tóxico y se usa ampliamente en recipientes y envases para alimentos. Las buenas propiedades eléctricas del aluminio lo hacen adecuado para muchas aplicaciones en la industria eléctrica. El precio relativamente bajo del aluminio (96¢/lb en 1989) junto con sus muchas propiedades útiles hace que sea muy importante en la industria.

Producción del aluminio El aluminio es el elemento metálico más abundante en la superficie de la Tierra y siempre se presenta combinado con otros elementos, como hierro, oxígeno y silicio. La bauxita, formada principalmente por óxidos de aluminio

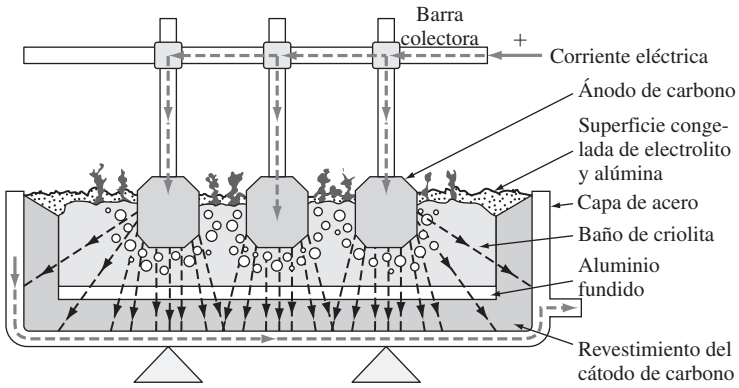


Figura 9.48
Cuba electrolítica utilizada en la producción del aluminio.
(Cortesía de Aluminum Company of America.)

Animación

hidratados es el mineral comercial más importante que se usa para producir aluminio. En el proceso Bayer, la bauxita reacciona con hidróxido de sodio caliente para convertir el aluminio del mineral de hierro en aluminato de sodio. Después de la separación del material insoluble, el hidróxido de aluminio se precipita a partir de la solución de aluminato. En la solución de hidróxido de aluminio se deja espesar y se calcina para obtener óxido de aluminio, Al_2O_3.

El óxido de aluminio se disuelve en un baño de criolita (Na_3AlF_6) fundida y se electroliza en una cuba electrolítica (figura 9.48) utilizando ánodo y cátodo de carbono. En el proceso de electrólisis se forma aluminio metálico en estado líquido, el cual se hunde en el fondo de la cuba y periódicamente se vacía. El aluminio extraído de la cuba suele contener de 99.5 a 99.9 por ciento de aluminio; el hierro y el silicio son las principales impurezas.

El aluminio que proviene de las cubas electrolíticas se lleva a grandes hornos con revestimiento refractario donde se refina antes de fundirlo en lingotes. Los elementos de la aleación y los lingotes maestros del elemento de aleación pueden fundirse y mezclarse también junto con la carga del horno. En la operación de refinación, el metal líquido suele purgarse con cloro gaseoso para eliminar el gas hidrógeno disuelto, tras de lo cual se hace un desnatado de la superficie de metal líquido para eliminar el metal oxidado. Después que el metal ha sido desgasado y desnatado, pasa por una criba y se funde en lingotes para ser vuelto a fundir, o bien se funde en formas primarias de lingote, como lámina, o en lingotes de extrusión para los procesos ulteriores de fabricación.

9.5.3 Aleaciones de aluminio forjado

Fabricación primaria Las formas de lingote como la lámina y los lingotes de extrusión suelen ser fundidos en un proceso semicontinuo mediante el *método de enfriamiento directo*. La figura 4.8 muestra de manera esquemática cómo se funde un lingote de aluminio por este método y la figura 4.1 es una fotografía de un lingote grande fundido de manera semicontinua al ser extraído del foso de colada.

En el caso de los lingotes de lámina, se elimina cerca de $\frac{1}{2}$ pulg de metal proveniente de la superficie de los lingotes que hará contacto con los rodillos del tren de laminado en caliente. Esta operación se llama *escalpación*; se realiza para garantizar que la lámina o la placa fabricada tengan una superficie limpia y tersa. A continuación, los

lingotes se *precalientan* u *homogeneizan* a altas temperaturas entre 10 y 24 h para permitir que la difusión atómica haga que la composición del lingote sea uniforme. El precalentamiento debe hacerse a una temperatura inferior al punto de fusión del elemento constitutivo que tenga la temperatura de fusión más baja.

Después del recalentamiento, los lingotes se *laminan en caliente* utilizando un tren de laminado en caliente con cuatro marchas altas y retroceso. Los lingotes suelen laminarse en caliente hasta alcanzar un grosor de 3 pulg aproximadamente; luego se vuelven a calentar y se laminan en caliente hasta llegar a un espesor de entre $\frac{3}{4}$ y 1 pulg, con un tren de laminado en caliente intermedio (figura 6.1). La reducción ulterior se realiza usualmente en una serie de trenes de laminado en caliente en tándem, para producir metal de aproximadamente 0.1 pulg de grosor. En la figura 6.8 se muestra una operación típica de laminado en caliente. Por lo general se necesita más de un recocido intermedio para producir lámina delgada.

Clasificación de las aleaciones de aluminio forjado Las aleaciones de aluminio producidas en forma forjada (por ejemplo, lámina, placa, extrusiones, varilla y alambre) se clasifican de acuerdo con los principales elementos con los que están aleados. Para identificar a las aleaciones forjadas de aluminio se utiliza una clave numérica de cuatro dígitos. El primer dígito indica el grupo de la aleación que contiene elementos aleados específicos. Los dos últimos dígitos identifican a la aleación de aluminio o indican su pureza. El segundo dígito indica la modificación de la aleación original o los límites de su impureza. En la tabla 9.7 se presenta la lista de los grupos de aleaciones de aluminio forjado.

Notación del templado Las notaciones del templado para las aleaciones de aluminio forjado siguen el sistema de usado para designar a las aleaciones y están separadas por un guión (por ejemplo, 1100-0). Las subdivisiones de un templado básico se indican mediante uno o varios dígitos a los que sigue la letra de la designación básica (por ejemplo, 1100-H14).

Notaciones básicas del templado

F—En estado tosco de fabricación. No hay control sobre la cantidad de endurecimiento de deformación; no hay límites en cuanto a las propiedades mecánicas.

O—Recocido y recristalizado. Templado con la más baja solidez y la más alta ductilidad.

H—Endurecido por tensión (en la siguiente sección se muestran las subdivisiones).

T—Tratado térmicamente para producir temples estables distintos de F u O (véase las subdivisiones presentadas en la siguiente subsección).

Tabla 9.7 Grupos de aleaciones de aluminio forjado

Aluminio, 99.00% como mínimo o más	1xxx
Aleaciones de aluminio agrupadas según los principales elementos en una aleación:	
Cobre	2xxx
Manganeso	3xxx
Silicio	4xxx
Magnesio	5xxx
Magnesio y silicio	6xxx
Zinc	7xxx
Otros elementos	8xxx
Series no utilizadas	9xxx

Subdivisiones endurecidas por tensión

H1—Endurecido únicamente por deformación. El grado de endurecimiento por tensión se indica con el segundo dígito y varía entre un cuarto de dureza (H12) hasta la dureza total (H18), lo cual se produce con una reducción del área de 75 por ciento aproximadamente.

H2—Endurecido por deformación y parcialmente recocido. Los templados fluctúan entre un cuarto de endurecimiento y el endurecimiento total, y se obtienen mediante el recocido parcial de materiales trabajados en frío con una resistencia inicial mayor de la deseada. Los templados son H22, H24, H26 y H28.

H3—Endurecido por tensión y estabilizado. Templados para aleaciones de aluminio-magnesio reblandecidas por envejecimiento que se endurecen por tensión y luego se calientan a baja temperatura para darles mayor ductilidad y estabilizar sus propiedades mecánicas. Los templados son H32, H34, H36 y H38.

Subdivisiones del tratamiento térmico

T1—Envejecido de manera natural. El producto se enfría después de un proceso de moldeo a temperatura alta y se deja envejecer naturalmente hasta que su condición es sustancialmente estable.

T3—Solución sometida a tratamiento térmico, trabajada en frío y envejecida naturalmente hasta que alcanza una condición sustancialmente estable.

T4—Solución tratada térmicamente y envejecida de manera natural hasta que su condición es sustancialmente estable.

T5—Enfriado a partir de un proceso de moldeo a temperatura alta y luego envejecido artificialmente.

T6—Solución sometida a tratamiento térmico y luego envejecida artificialmente.

T7—Solución sometida a tratamiento térmico y estabilizada.

T8—Solución sometida a tratamiento térmico, trabajada en frío y luego envejecida artificialmente.

Aleaciones de aluminio forjado no tratables térmicamente Las aleaciones de aluminio forjado pueden dividirse convenientemente en dos grupos: *aleaciones no tratables térmicamente* y *aleaciones tratables térmicamente*. Las aleaciones de aluminio no tratables térmicamente no pueden aumentar su resistencia mediante precipitación, porque para ello únicamente pueden trabajarse en frío. Los tres principales grupos de aleaciones de aluminio forjado no tratables térmicamente son los grupos 1xxx, 3xxx y 5xxx. En la tabla 9.8 se da una lista de la composición química, las propiedades mecánicas típicas y las aplicaciones de una selección de aleaciones de aluminio forjado que tienen importancia industrial.

Aleaciones 1xxx. Estas aleaciones tienen como mínimo 99.0 por ciento de aluminio y sus principales impurezas (elementos de aleación) son el hierro y el silicio. Se les agrega 0.12 por ciento de cobre para darles mayor resistencia. La aleación 1100 tiene una resistencia a la tensión de 13 ksi (90 MPa) aproximadamente en su estado recocido y se usa principalmente en aplicaciones a base de trabajo con lámina de metal.

Aleaciones 3xxx. El *manganeso* es el principal elemento de aleación de este grupo y refuerza al aluminio mediante el aumento en resistencia de la solución sólida. La aleación más importante de este grupo es la 3003, que es en

Tabla 9.8 Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de las aleaciones de aluminio

Número de aleación*	Composición química (% en peso)†	Estado‡	Resistencia a la tensión		Límite elástico		Elongación (%)	Aplicaciones típicas
			ksi	MPa	ksi	MPa		
Aleaciones forjadas								
1100	99.0 mín Al, 0.12 Cu	Recocido (-O)	13	89 (prom)	3.5	24 (prom)	25	Trabajos en lámina de metal, material para aletas
		Semirrígido (-H14)	18	124 (prom)	14	97 (prom)	4	
3003	1.2 Mn	Recocido (-O)	17	117 (prom)	5	34 (prom)	23	Recipientes de presión, equipo químico, trabajos en lámina de metal
		Semirrígido (-H14)	23	159 (prom)	23	159 (prom)	17	
5052	2.5 Mg, 0.25 Cr	Recocido (-O)	28	193 (prom)	9.5	65 (prom)	18	Usos marítimos, autobuses y camiones, tubos hidráulicos
		Semirrígido (-H34)	38	262 (prom)	26	179 (prom)	4	
2024	4.4 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn	Recocido (-O)	32	220 (máx)	14	97 (máx)	12	Estructuras aeronáuticas
		Tratado térmicamente (-T6)	64	442 (mín)	50	345 (mín)	5	
6061	1.0 Mg, 0.6 Si, 0.27 Cu, 0.2 Cr	Recocido (-O)	22	152 (máx)	12	82 (máx)	16	Estructuras de camiones y marítimas, tuberías, balaustradas
		Tratado térmicamente (-T6)	42	290 (mín)	35	241 (mín)	10	
7075	5.6 Zn, 2.5 Mg, 1.6 Cu, 0.23 Cr	Recocido (-O)	40	276 (máx)	21	145 (máx)	10	Estructuras aeronáuticas y otras
		Tratado térmicamente (-T6)	73	504 (mín)	62	428 (mín)	8	
Aleaciones para fundir								
355.0	5 Si, 1.2 Cu, 0.5 Mg	Moldeo en arena (-T6)	32	220 (mín)	20	138 (mín)	2.0	Alojamiento de bombas, accesorios aeronáuticos, cárter de motores
		Molde permanente (-T6)	37	285 (mín)	…	…	1.5	
356.0	7 Si, 0.3 Mg	Moldeo en arena (-T6)	30	207 (mín)	20	138 (mín)	3	Cajas de transmisión, alojamientos de ejes de camiones ruedas de camión
		Molde permanente(-T6)	33	229 (mín)	22	152 (mín)	3	
332.0	9.5 Si, 3 Cu, 1.0 Mg	Molde permanente (-T5)	31	214 (mín)				Pistones automotrices
413.0	12 Si, 2 Fe	Fundido de matrices	43	297	21	145 (mín)	2.5	Vaciado de piezas grandes y complejas

*Número de la Aluminum Association.
†El resto es aluminio.
‡O = recocido y recristalizado; H14 = endurecido únicamente por tensión; H34 = endurecido por tensión y estabilizado; T5 = enfriado después de un proceso de conformación a alta temperatura, después envejecido artificialmente; T6 = solución tratada térmicamente y luego envejecida de manera artificial.

esencia una aleación 1100 con la adición de 1.25 por ciento de manganeso aproximadamente. La aleación 3003 tiene una resistencia a la tensión de casi 16 ksi (110 MPa) cuando está recocida y se utiliza como una aleación de aplicación general cuando se requiere un material altamente trabajable.

Aleaciones 5xxx. El *magnesio* es el principal elemento de aleación de este grupo y se añade para el endurecimiento por solución sólida en cantidades de hasta 5%. Una de las aleaciones de este grupo más importantes para la industria es la 5052, que contiene casi 2.5% de magnesio (Mg) y 0.2% de cromo (Cr). En el estado recocido, la aleación 5052 tiene una resistencia a la tensión de 28 ksi (193 MPa) aproximadamente. Esta aleación se usa también para trabajos en lámina de metal, sobre todo para aplicaciones marítimas, en autobuses y camiones.

Aleaciones de aluminio forjado térmicamente tratables Algunas aleaciones de aluminio pueden incrementar su resistencia por precipitación mediante un tratamiento térmico (véanse las págs. 406 a 410). Las aleaciones de aluminio forjado térmicamente tratables de los grupos 2xxx, 6xxx y 7xxx se aumentan su resistencia por precipitación mediante mecanismos similares al que se describe en la sección 9.5 para aleaciones de aluminio-cobre. En la tabla 9.8 se incluye la lista de las composiciones químicas, las propiedades mecánicas típicas y las aplicaciones de algunas aleaciones de aluminio térmicamente tratables que tienen importancia industrial. En la figura 9.49 se muestra un soporte lleno de extrusiones fabricadas con aleaciones de aluminio a punto de ser tratadas térmicamente por solución en un tratamiento térmico industrial para incrementar su dureza por precipitación.

Aleaciones 2xxx. El principal elemento de aleación de este grupo es el *cobre*, pero también se agrega magnesio a la mayoría de esas aleaciones. Además, se les añaden otros elementos en pequeñas cantidades. Una de las aleaciones más importantes de este grupo es la 2024, que contiene casi 4.5% de cobre (Cu),

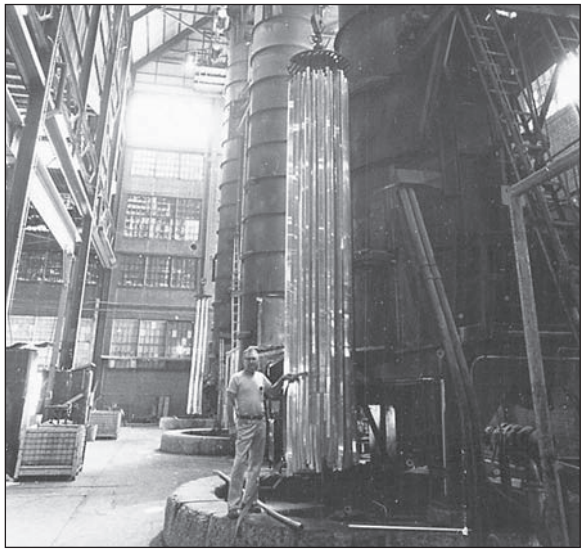


Figura 9.49
Endurecimiento por precipitación a escala industrial (endurecimiento de extrusiones de aleaciones de aluminio).
(Cortesía de Reynolds Metals Co.)

1.5% de Mg y 0.6% de Mn. Esta aleación se endurece en primer término mediante procedimientos por solución sólida y por precipitación. El principal precipitado de endurecimiento es un compuesto intermetálico que tiene aproximadamente la misma composición que el Al_2CuMg. La aleación 2024 en el estado T6 tiene una resistencia a la tensión de unos 64 ksi (442 MPa) y se usa, por ejemplo, en materiales estructurales aeronáuticos.

Aleaciones 6xxx. Los principales elementos de aleación para el grupo 6xxx son el *magnesio* y el *silicio*, que se combinan para formar un compuesto intermetálico, Mg_2Si, que en forma de precipitado endurece a este grupo de aleaciones. La aleación 6061 es una de las más importantes de este grupo y tiene una composición aproximada de 1.0% de Mg, 0.6% de Si, 0.3% de Cu y 0.2% de Cr. Esta aleación, en el estado de tratamiento térmico T6, tiene una resistencia a la tracción de 42 ksi (290 MPa) aproximadamente y se usa para elementos estructurales de propósito general.

Aleaciones 7xxx. Los principales elementos de aleación para el grupo de aleaciones de aluminio 7xxx son el zinc, el magnesio y el cobre. El zinc y el magnesio se combinan para formar un compuesto intermetálico, $MgZn_2$, que es el precipitado básico para aumentar la dureza de estas aleaciones cuando se tratan térmicamente. La solubilidad relativamente alta del zinc y del magnesio en el aluminio hacen posible crear una alta densidad de precipitados y, por lo tanto, producir muy grandes incrementos de dureza. La aleación 7075 es una de las más importantes de este grupo y tiene una composición aproximada de 5.6% de Zn, 2.5% de Mg, 1.6% de Cu y 0.25% de Cr. La aleación 7075, cuando es tratada térmicamente hasta el templado T6, tiene una resistencia a la tracción de 73 ksi (504 MPa) aproximadamente y se usa principalmente en elementos estructurales de aeronáutica.

9.5.4 Aleaciones de fundición de aluminio

Procesos de moldeo Las aleaciones de aluminio suelen ser moldeadas por alguno de los tres procesos principales: moldeo en arena, moldeo permanente y fundido de matrices.

El *moldeo en arena* es el más sencillo y versátil de los procesos de fundición de aluminio. En la figura 9.50 se muestra cómo se construye un molde simple de arena para producir objetos fundidos en arena. El proceso de moldeo en arena suele elegirse para la producción de (1) pequeñas cantidades de vaciados idénticos, (2) moldeos complicados con núcleos complejos, (3) vaciados grandes y (4) fundidos estructurales.

En el *vaciado en molde permanente*, el metal fundido se vierte en un molde permanente de metal simplemente por gravedad, baja presión o presión centrífuga. En la figura 6.2 se muestra un molde permanente abierto, mientras que en la figura 6.3*a* se ilustra el vaciado en molde permanente de dos pistones para automóvil hechos de una aleación de aluminio. Los vaciados de la misma aleación y forma, producidos con un molde permanente, tienen una estructura de grano más fina y mayor resistencia que los vaciados hechos en moldes de arena. La velocidad de enfriamiento más rápida del fundido en los moldes permanentes produce una estructura de grano más fino. Además, los fundidos en moldes permanentes suelen tener menor contracción y porosidad producida por gases que en los fundidos en arena. Sin embargo, los moldes permanentes tienen limitaciones de tamaño y las piezas complejas pueden ser difíciles o imposibles de vaciar utilizando un molde permanente.

En el *fundido de matrices,* partes idénticas se funden a velocidades de producción máximas, introduciendo el metal fundido en los moldes de metal bajo una presión con-

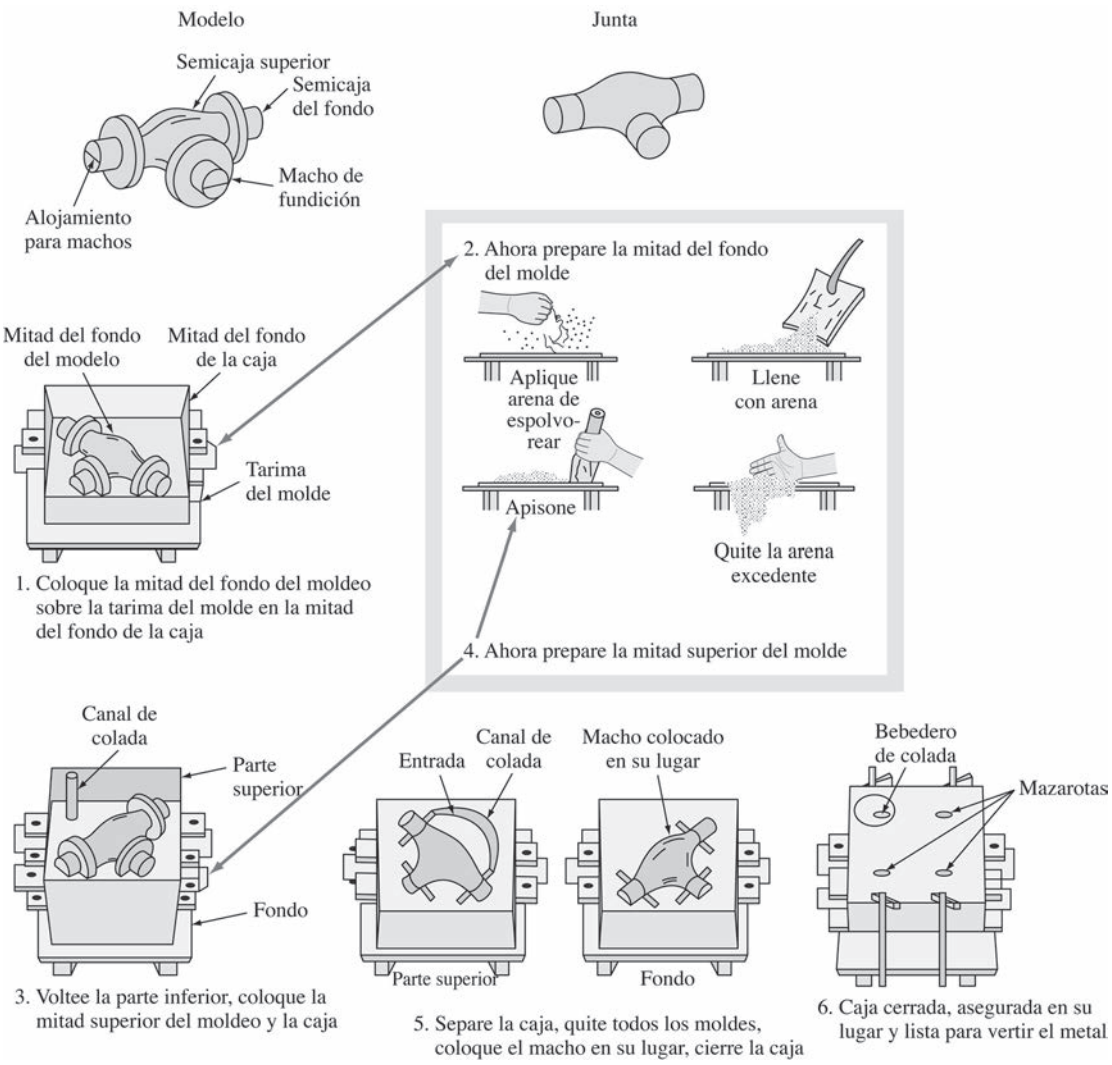


Figura 9.50
Pasos en la construcción de un molde sencillo de arena para hacer un vaciado en arena.
(Según H. F. Taylor, M. C. Flemings y J. Wulff, "Foundry Engineering", Wiley, 1959, pág. 20.)

siderable. Las dos mitades del troquel del metal se arman y se aseguran juntas para que resistan la alta presión. El aluminio fundido es forzado a fluir dentro de las cavidades de las matrices. Cuando el metal se ha solidificado, las matrices se sueltan y se abren para extraer la pieza fundida caliente. Las mitades de la matriz se vuelven a unir firmemente y el ciclo de fundido se repite. Algunas ventajas del fundido de matrices son (1) las partes fundidas por este método salen casi totalmente acabadas y pueden fabricarse con altas velocidades de producción, (2) las tolerancias dimensionales de cada parte fundida pueden mantenerse con mayor precisión que con ningún otro proceso de fundición importante, (3) es posible obtener superficies tersas en las piezas fundidas, (4) el enfriamiento rápido de la fundición produce una estructura de grano fino y (5) el proceso se puede automatizar fácilmente.

Tabla 9.9 Grupos de aleación de aluminio fundido

Aluminio, 99.00% como mínimo o más	1xx.x
Aleaciones de aluminio agrupadas según los principales elementos aleados:	
Cobre	2xx.x
Silicio con cobre y/o magnesio agregado	3xx.x
Silicio	4xx.x
Magnesio	5xx.x
Zinc	7xx.x
Estaño	8xx.x
Otros elementos	9xx.x
Series no utilizadas	6xx.x

Composiciones de aleaciones de aluminio de fundición Se han desarrollado aleaciones de aluminio que ofrecen cualidades de fundición tales como fluidez y facilidad de vertido, además de propiedades tales como solidez, ductilidad y resistencia a la corrosión. Por lo tanto, tienen composiciones químicas muy diferentes a las de las aleaciones de aluminio forjado. La tabla 9.8 enlista las composiciones químicas, las propiedades mecánicas y las aplicaciones de una selección de aleaciones de aluminio para fundición. En Estados Unidos, esas aleaciones se clasifican según el sistema de la Aluminum Association. En este sistema, las aleaciones de aluminio de fundición se agrupan en función de los principales elementos que contienen en aleación, empleando un número de cuatro dígitos con un punto entre los dos últimos dígitos, como puede verse en la lista de la tabla 9.9.

El silicio, en el rango de 5 a 12 por ciento aproximadamente, es el elemento de aleación más importante en las aleaciones de aluminio de fundición pues aumenta la fluidez del metal fundido y la facilidad con que se puede alimentar dentro del molde, y también refuerza al aluminio. El magnesio en el rango de 0.3 a 1 por ciento se adiciona para incrementar la resistencia, sobre todo mediante el endurecimiento por precipitación durante el tratamiento térmico. El cobre, en el rango de 1 a 4 por ciento aproximadamente, se añade también a algunas aleaciones de aluminio de fundición para aumentar la resistencia, sobre todo a altas temperaturas. Asimismo, otros elementos de aleación, como el zinc, estaño, titanio y cromo, se agregan a algunas aleaciones de aluminio de fundición.

En algunos casos, si la velocidad de enfriamiento del vaciado solidificado en el molde es suficientemente rápida, se puede producir una aleación térmicamente tratable en estado sólido sobresaturado. Por tanto, los pasos de tratamiento térmico y templado de la solución se pueden omitir para el endurecimiento por precipitación de la colada, y sólo se necesita el envejecimiento ulterior de ésta después que se ha quitado del molde. Un buen ejemplo de la aplicación de este tipo de tratamiento térmico se encuentra en la producción de pistones para automóvil endurecidos por precipitación. Los pistones ilustrados en la figura 6.3*a*, después de sacados del molde, sólo necesitan un tratamiento de envejecimiento para endurecerlos por precipitación. Este revenido por tratamiento térmico se denomina T5.

9.6 ALEACIONES DE COBRE

9.6.1 Propiedades generales del cobre

El cobre es un metal importante en ingeniería y se usa ampliamente sin aleación alguna y también combinado con otros metales en diversas aleaciones. En la forma no

aleada, el cobre tiene una extraordinaria combinación de propiedades para aplicaciones industriales. Algunas de ellas son de alta conductividad eléctrica y térmica, buena resistencia a la corrosión, facilidad de fabricación, resistencia media a la tracción, propiedades controlables en el recocido y características generales para la soldadura y las uniones. Se pueden obtener resistencias superiores con una serie de aleaciones de latón y bronce que son indispensables para muchas aplicaciones de ingeniería.

9.6.2 Producción del cobre

La mayor parte del cobre se extrae de minerales que contienen sulfuros de cobre y de hierro. Los concentrados de sulfuro de cobre que se obtienen a partir de mineral de baja clasificación se funden en un horno de reverbero para producir una mata, la cual es una mezcla de sulfuros de cobre y de hierro, y se separan de la escoria (material de desecho). El sulfuro de cobre en una mata se convierte entonces químicamente en cobre impuro o poroso (98% + Cu) soplando aire a través de la escoria. El sulfuro de hierro se oxida primero y se le extrae la escoria en esta operación. Después, la mayor parte de las impurezas del cobre poroso se eliminan en un horno de refinación y se extraen en forma de escoria. Este cobre refinado al fuego se llama *cobre tenaz* y aunque se puede usar para algunas aplicaciones, la mayor parte del cobre tenaz se refina después por medios electrolíticos para obtener *cobre tenaz electrolítico* de 99.95 por ciento (*ETP*).

9.6.3 Clasificación de las aleaciones de cobre

En Estados Unidos, las aleaciones de cobre se clasifican de acuerdo con un sistema de designación administrado por la *Copper Development Association* (CDA). En ese sistema, los números C10100 a C79900 designan aleaciones forjadas y los números del C80000 al C99900 designan aleaciones fundidas. En la tabla 9.10 se muestra una lista de grupos de aleaciones de cada nivel importante y en la tabla 9.11 se listan las composiciones químicas, las propiedades mecánicas típicas y las aplicaciones de algunas aleaciones de cobre seleccionadas.

Tabla 9.10 Clasificación de las aleaciones de cobre (sistema de la Copper Development Association)

Aleaciones forjadas	
C1xxxx	Cobres* y aleaciones con alto contenido de cobre†
C2xxxx	Aleaciones de cobre-zinc (latones)
C3xxxx	Aleaciones de cobre-zinc-plomo (latones plomados)
C4xxxx	Aleaciones de cobre-zinc-estaño (latones de estaño)
C5xxxx	Aleaciones de cobre-estaño (bronces de fósforo)
C6xxxx	Aleaciones de cobre-aluminio (bronces de aluminio), aleaciones de cobre-silicio (bronces de silicio) y aleaciones diversas de cobre-zinc
C7xxxx	Aleaciones de cobre-níquel y de cobre-níquel-zinc (niquelados plateados)
Aleaciones fundidas	
C8xxxx	Cobres forjados, aleaciones con alto contenido de cobre, latones fundidos de diversos tipos, aleaciones fundidas de manganeso-bronce y aleaciones fundidas de cobre-zinc-silicio
C9xxxx	Aleaciones fundidas de cobre-estaño, aleaciones de cobre-estaño-plomo, aleaciones de cobre-estaño-níquel, aleaciones de cobre-aluminio-hierro y aleaciones de cobre-níquel-hierro y de cobre-níquel-zinc

*Los "cobres" tienen un contenido mínimo de 99.3 por ciento o más de cobre.
†Las aleaciones de alto contenido de cobre tienen menos de 99.3 por ciento de Cu, pero más del 96 por ciento y no encajan en los otros grupos de aleaciones de cobre.

Tabla 9.11 Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de las aleaciones de cobre

Número de aleación	Composición química (% en peso)	Estado	Resistencia a la tensión ksi	Resistencia a la tensión MPa	Límite elástico ksi	Límite elástico MPa	Elongación en 2 pulg (%)	Aplicaciones típicas
Aleaciones forjadas								
C10100	99.99 Cu	Recocido Trabajado en frío	32 50	220 345	10 45	69 310	45 6	Conductores comunes, guías de ondas, conductores huecos, alambre de acometida y ánodos para tubos de vacío, sellos al vacío, componentes de transistores, sellos de vidrio a metal, cables y tubos coaxiales, klistrones, tubos de microondas, rectificadores
C11000 (ETP)	99.9 Cu, 0.04 O	Recocido Trabajado en frío	32 50	220 345	10 45	69 310	45 6	Canalones, techos, juntas, radiadores de automóvil, barras colectoras, clavos, cilindros de impresión, remaches, partes para equipo de radio
C26000	70 Cu, 30 Zn	Recocido Trabajado en frío	47 76	325 525	15 63	105 435	62 8	Elementos y tanques de radiador, cuerpos cilíndricos de lámparas de mano, accesorios de iluminación, sujetadores, cerraduras, bisagras, componentes de munición, accesorios de plomería, goznes, remaches
C28000	60 Cu, 40 Zn	Recocido Trabajado en frío	54 70	370 485	21 50	145 345	45 10	Tuercas y pernos grandes para arquitectura, varillas de soldadura, placas de condensador, tuberías de intercambiadores de calor y condensadores, forjas en caliente
C17000	99.5 Cu, 1.7 Be, 0.20 Co	SHT* SHT, CW, PH*	60 180	410 1 240	28 155	190 1 070	60 4	Fuelles, tubos Bourdon, diafragmas, sujetafusibles, retenes, arandelas de presión, resortes, partes de interruptor, pasadores de rodillos, válvulas, equipo para soldar
C61400	95 Cu, 7 Al, 2 Fe	Recocido Trabajado en frío	80 89	550 615	40 60	275 415	40 32	Tuercas, pernos, riostras y miembros roscados, recipientes y tanques resistentes a la corrosión, componentes estructurales, partes de máquinas, tubos y sistemas de tubería para condensadores, revestimientos de protección y sujetadores marítimos

C71500	70 Cu, 30 Ni	Recocido Trabajado en frío	55 84	380 580	18 79	125 545	36 3	Relés de comunicaciones, condensadores, placas de condensador, resortes eléctricos, tubos de evaporadores e intercambiadores de calor, casquillos, resistores
		Aleaciones fundidas						
C80500	99.75 Cu	Fundido tosco	25	172	9	62	40	Conductores eléctricos y térmicos; aplicaciones resistentes a la corrosión y a la oxidación
C82400	96.4 Cu, 1.70 Be, 0.25 Co	Fundido tosco Tratamiento térmico	72 150	497 1 035	37 140	255 966	20 1	Herramientas de seguridad, moldes para partes de plástico, levas, boquillas, cojinetes, válvulas, partes de bomba, engranajes
C83600	85 Cu, 5 Sn, 5 Pb, 5 Zn	Fundido tosco	37	255	17	117	30	Válvulas, bridas, accesorios de cañería, productos de plomería, fundiciones de bombas, ruedas de paletas y carcasas de bombas, accesorios ornamentales, engranajes pequeños
C87200	89 Cu, 4 Si	Fundido tosco	55	379	25	172	30	Cojinetes, cinturones, ruedas de paletas para bombas y componentes de válvulas, anillos de cerrado, codos que favorecen la resistencia a la corrosión
C90300	93 Cu, 8 Sn, 4 Zn	Fundido tosco	45	310	21	145	30	Cojinetes, boquillas, ruedas de paletas para bombas, anillos de pistón, componentes de válvulas, anillos de sellado, conectores para vapor, engranajes
C95400	85 Cu, 4 Fe, 11 Al	Fundido tosco Tratamiento térmico	85 105	586 725	35 54	242 373	18 8	Cojinetes, engranajes, tornillos sin fin, asientos y guías de válvula, ganchos de decapado
C96400	69 Cu, 30 Ni, 0.9 Fe	Fundido tosco	68	469	37	255	28	Válvulas, carcasas de bomba, bridas, codos que favorecen la resistencia a la corrosión por agua de mar

*SHT = solución térmicamente tratada; CW = trabajado en frío; PH = endurecido por precipitación.

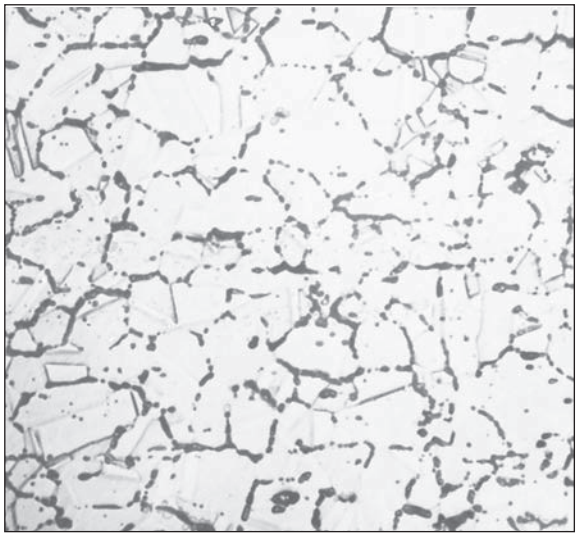
9.6.4 Aleaciones de cobre forjado

Cobre no aleado El cobre no aleado es un metal importante en ingeniería y, por su alta conductividad eléctrica, se usa en gran medida en la industria eléctrica. El cobre tenaz electrolítico es el menos costoso de los cobres industriales y se usa para la producción de alambre, varilla, placas y tiras. El cobre ETP tiene un contenido nominal de oxígeno de 0.04 por ciento. El oxígeno es casi insoluble en el cobre ETP y forma Cu_2O interdendrítico cuando el cobre es fundido. Para la mayoría de las aplicaciones, el oxígeno del cobre ETP es una impureza insignificante. Sin embargo, si el cobre ETP se calienta a una temperatura superior a 400°C, en una atmósfera que contenga hidrógeno, éste se puede difundir en el cobre sólido y reacciona con el Cu_2O disperso en su interior para formar vapor de acuerdo con la siguiente reacción

$$Cu_2O + H_2 \text{ (disuelto en Cu)} \rightarrow 2Cu + H_2O \text{ (vapor)}$$

Las grandes moléculas de agua formadas por la reacción no se difunden fácilmente, por lo cual forman huecos internos, sobre todo en los límites del grano, y eso hace que el cobre sea frágil (figura 9.51).

Para evitar la que el cobre se vuelva frágil por el hidrógeno del Cu_2O, el oxígeno puede hacerse reaccionar con fósforo para formar pentóxido de fósforo (P_2O_5) (aleación C12200). Otra manera de evitar que se vuelva frágil por el hidrógeno, consiste en eliminar el oxígeno del cobre, fundiendo el cobre ETP bajo una atmósfera reductora



Laboratorio virtual

Figura 9.51
Cobre tenaz electrolítico expuesto a hidrógeno a 850°C durante $\frac{1}{2}$ h; la estructura muestra huecos internos ocasionados por el vapor, lo cual hace que el cobre sea frágil. (Grabado: dicromato de potasio; amplificación 150×.)
(Cortesía de Amax Base Metals Research, Inc.)

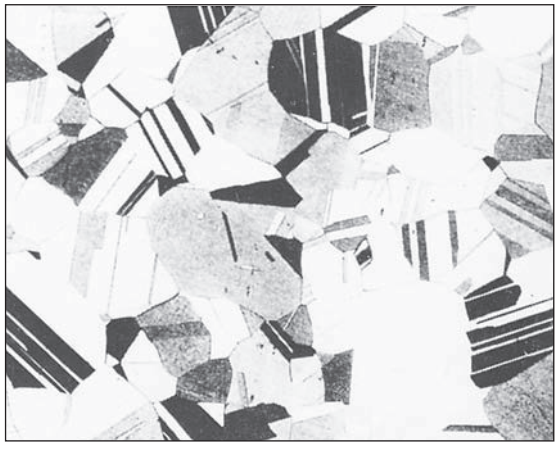


Figura 9.52
Microestructuras de latón para cartuchería (70% Cu-30% Zn) en estado recocido. (Decapante: $NH_4OH + H_2O_2$; amplificación 75×.)

controlada. El cobre producido por este método recibe el nombre de *cobre de alta conductividad libre de oxígeno* (*OFHC*) y es la aleación C10200.

Aleaciones cobre-zinc Los latones cobre-zinc consisten en una serie de aleaciones de cobre con adiciones de entre 5 y 40 por ciento de zinc. El cobre forma soluciones sólidas de sustitución con zinc hasta casi 35 por ciento de zinc, lo cual se aprecia porque está todo dentro de la fase totalmente alfa del diagrama de fases Cu-Zn (figura 8.27). Cuando el contenido de zinc llega a 40 por ciento aproximadamente, se forman aleaciones con dos fases, alfa y beta.

La microestructura de los latones de una sola fase alfa consiste en una solución sólida alfa como se aprecia en la figura 9.52 para una aleación de 70% Cu-30% Zn (C26000, latón para cartuchería). La microestructura del latón 60% Cu-40% Zn (C28000, metal de Muntz) tiene dos fases, alfa y beta, como se muestra en la figura 9.53.

Pequeñas cantidades de plomo (0.5 a 3 por ciento) se agregan a algunos latones Cu-Zn para facilitar su maquinado. El plomo es casi insoluble en el cobre sólido y se distribuye en los latones con plomo en pequeños glóbulos (figura 9.54).

Las resistencias a la tensión de algunos latones seleccionados se enlista en la tabla 9.11. Esas aleaciones tienen una resistencia mediana (34 a 54 ksi; 234 a 374 MPa) en condicion revertida y pueden trabajarse en frío para mejorar su resistencia.

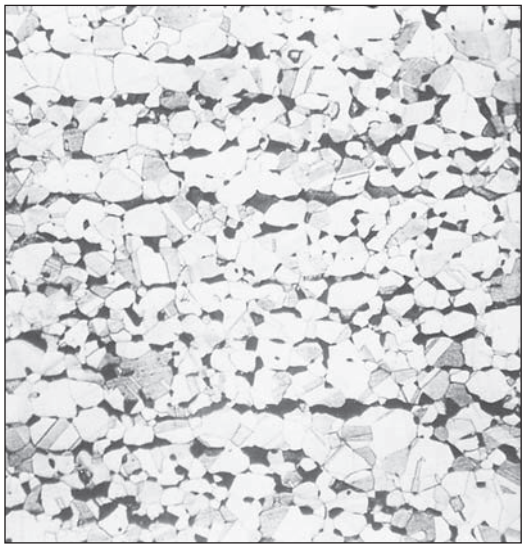


Figura 9.53
Lámina de metal de Muntz laminada en caliente (60% Cu-40% Zn). La estructura consiste en una fase beta (oscura) y una fase alfa (clara). (Decapante: $NH_4OH + H_2O_2$; amplificación 75×.)
(Cortesía de Anaconda American Brass Co.)

Figura 9.54
Varilla extruida de latón cortada libremente que muestra los glóbulos de plomo alargados. Esto indica que la estructura está en la fase α. (Decapante: $NH_4OH + H_2O_2$; amplificación 75×.)
(Cortesía de Anaconda American Brass Co.)

Bronces de cobre-estaño Las aleaciones de cobre-estaño, que reciben apropiadamente el nombre de *bronces de estaño*, pero a menudo se designan como *bronces de fósforo*, se producen agregando al cobre entre 1 y 10 por ciento de estaño para formar aleaciones endurecidas por solución sólida. Los bronces de estaño forjado son más resistentes que los cobres Cu-Zn, sobre todo en condiciones de trabajo en frío y tienen mayor resistencia a la corrosión, pero son más caros. Las aleaciones de fundición Cu-Sn contienen hasta 16 por ciento de Sn aproximadamente y se usan para fabricar cojinetes y discos de engranajes de alta resistencia. A estas aleaciones se les agregan grandes cantidades de plomo (5 a 10 por ciento) a fin de dar lubricación a las superficies de los cojinetes.

Aleaciones de cobre-berilio Las aleaciones de cobre-berilio se producen con contenidos de 0.6 a 2 por ciento de Be con adición de cobalto en proporciones del 0.2 al 2.5 por ciento. Esas aleaciones pueden endurecerse por precipitación y ser tratadas térmicamente y luego trabajadas en frío a fin de lograr resistencias a la tensión de hasta 212 ksi (1 463 MPa), que es la resistencia más alta lograda en las aleaciones comerciales del cobre. Las aleaciones Cu-Be se usan en herramientas para la industria química que necesitan alta dureza y que no produzcan chispas. La excelente resistencia a la corrosión, las propiedades de fatiga y la solidez de estas aleaciones hace que sean útiles para fabricar resortes, engranajes, diafragmas y válvulas. Sin embargo, tienen la desventaja de ser materiales relativamente costosos.

9.7 ACEROS INOXIDABLES

Los aceros inoxidables se eligen como materiales de ingeniería principalmente por su excelente resistencia a la corrosión en muchos ambientes. La resistencia de los aceros inoxidables a la corrosión se debe a su alto contenido de cromo. Para fabricar un "acero inoxidable", tiene que haber por lo menos 12 por ciento de cromo (Cr) en el acero. Según la teoría clásica, el cromo forma un óxido superficial que protege de la corrosión a la aleación de hierro-cromo subyacente. Para producir el óxido protector, el acero inoxidable tiene que estar expuesto a agentes oxidantes.

En general existen cuatro tipos principales de aceros inoxidables: ferrítico, martensítico, austenítico y endurecido por precipitación. Sólo los tres primeros tipos se analizan brevemente en esta sección.

9.7.1 Aceros inoxidables ferríticos

Son esencialmente aleaciones binarias de hierro-cromo que contienen entre 12 y 30 por ciento de Cr. Se denominan ferríticos porque su estructura se mantiene principalmente en ese estado (cc, tipo hierro α) en condiciones de tratamiento térmico normal. En virtud de que el cromo tiene la misma estructura cristalina cc que la ferrita α, extiende la región de fase α y suprime la región de fase γ. En consecuencia, se forma el "bucle γ" en el diagrama de fases Fe-Cr y éste se divide en las regiones ccc y cc (figura 9.55). Los aceros inoxidables ferríticos, por el hecho de que contienen más de 12 por ciento de Cr, no sufren la transformación de ccc a cc y se enfrían a partir de altas temperaturas como soluciones sólidas de cromo en hierro α.

En la tabla 9.12 se enlistan las composiciones químicas, las propiedades mecánicas típicas y las aplicaciones de una selección de aceros inoxidables, entre ellos el ferrítico tipo 430.

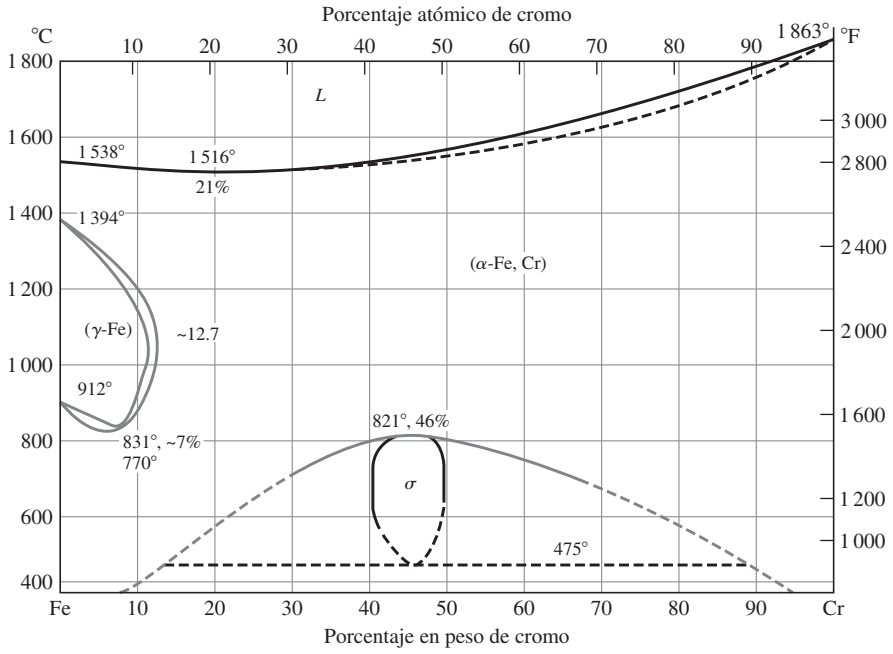


Figura 9.55
Diagrama de fases de hierro-cromo.
(Según Metals Handbook", vol. 8, 8a. ed., American Society for Metals, 1973, pág. 291.)

Ice Nine

Los aceros inoxidables ferríticos tienen un costo relativamente bajo porque no contienen níquel. Se usan principalmente como materiales de construcción de tipo general cuando se necesita su resistencia especial a la corrosión y al calor. En la figura 9.56 se muestra la microestructura del acero inoxidable ferrítico tipo 430 en estado recocido. La presencia de los carburos en este acero reduce en cierto grado su resistencia a la corrosión. En fechas más recientes se han desarrollado nuevos compuestos ferríticos con muy bajos niveles de carbono y nitrógeno, con lo cual ha mejorado su resistencia a la corrosión.

9.7.2 Aceros inoxidables martensíticos

Los aceros inoxidables martensíticos son esencialmente aleaciones Fe-Cr que contienen entre 12 y 17 por ciento de Cr y tienen suficiente carbono (0.15 a 1.0% C) para que se pueda producir mediante el templado una estructura martensítica a partir de la región de la fase austenítica. Estas aleaciones se denominan *martensíticas* porque son capaces de desarrollar una estructura de ese tipo después de un tratamiento térmico de austenitizado y templado. Debido a que la composición de los aceros inoxidables martensíticos se ajusta para optimizar su solidez y dureza, la resistencia a la corrosión de estos aceros es relativamente mala en comparación con los de tipo ferrítico y austensítico.

El tratamiento térmico de los aceros inoxidables martensíticos para dotarlos de mayor solidez y tenacidad es básicamente el mismo que se usa para los aceros al carbono simples y los de baja aleación. Es decir, la aleación es austenitizada, enfriada con suficiente rapidez para producir una estructura martensítica y luego se reviene para re-

Tabla 9.12 Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de los aceros inoxidables

Número de aleación	Composición química (% en peso)*	Estado	Resistencia a la tracción		Límite elástico		Alargamiento en 2 pulg (%)	Aplicaciones típicas
			ksi	MPa	ksi	MPa		
Aceros inoxidables ferríticos								
430	17 Cr, 0.012 C	Recocido	75	517	50	345	25	Para propósito general, no templable; usos: campanas de chimenea de cocina, equipo de restaurante
446	25 Cr, 0.20 C	Recocido	80	552	50	345	20	Aplicaciones de alta temperatura; calentadores, cámaras de combustión
Aceros inoxidables martensíticos								
410	12.5 Cr, 0.15 C	Recocido Q y T†	75	517	40	276	30	De uso general termotratable; partes de maquinaria, pozos de bomba, válvulas
440A	17 Cr, 0.70 C	Recocido Q y T†	105 265	724 1 828	60 245	414 1 690	20 5	Cubiertos, cojinetes, instrumentos quirúrgicos
440C	17 Cr, 1.1 C	Recocido Q y T†	110 285	759 1 966	70 275	276 1 897	13 2	Bolas, cojinetes, anillos de bolas, partes de válvulas
Aceros inoxidables austensíticos								
301	17 Cr, 7 Ni	Recocido	110	759	40	276	60	Aleación con alta tasa de endurecimiento por deformación plástica; aplicaciones estructurales
304	19 Cr, 10 Ni	Recocido	84	580	42	290	55	Equipo químico y para procesamiento de alimentos
304L	19 Cr, 10 Ni, 0.03 C	Recocido	81	559	39	269	55	Material bajo en carbono para soldadura; depósitos químicos
321	18 Cr, 10 Ni, Ti = 5 × %C mín	Recocido	90	621	35	241	45	Estabilizado para soldadura; equipo de procesamiento, recipientes a presión
347	18 Cr, 10 Ni, Cb (Nb) = 10 × C min	Recocido	95	655	40	276	45	Material estabilizado para soldadura; vagones cisterna para productos químicos
Aceros inoxidables endurecidos por precipitación								
17-4PH	16 Cr, 4 Ni, 4 Cu, 0.03 Cb (Nb)	Endurecido por precipitación	190	1 311	175	1 207	14	Engranajes, levas, sistemas de transmisión, partes aeronáuticas y de turbinas

*Balance de Fe.
†Templado y revenido.

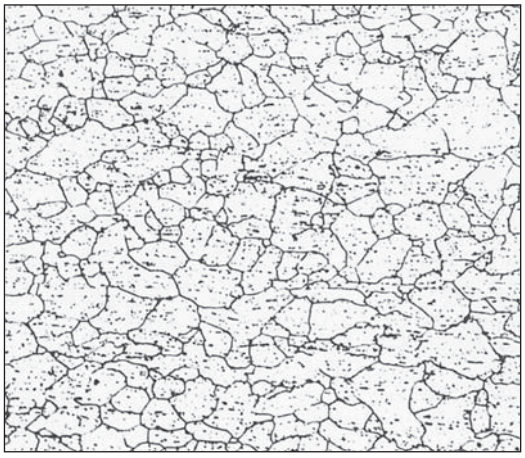


Figura 9.56
Tira de acero inoxidable (ferrítico) tipo 430 recocido a 788°C (1 450°F). La estructura consiste en una matriz de ferrita con grano equiaxial y partículas de carburo dispersas. (Decapante: Picral + HCl; amplificación 100×.) *(Cortesía de United States Steel Corp., Research Laboratories.)*

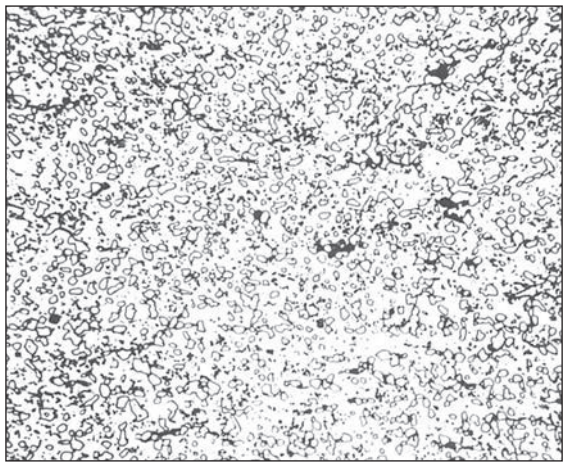


Figura 9.57
Acero inoxidable (martensítico) tipo 440C endurecido por austenitizado a 1 010°C (1 850°F) y enfriado por aire. La estructura consiste en carburos primarios en una matriz de martensita. (Decapante: HCl + picral; amplificación 500×.) *(Cortesía de Allegheny Ludlum Steel Co.)*

lajar las tensiones e incrementar la tenacidad. La alta templabilidad de las aleaciones de Fe-12 a 17% Cr evita la necesidad del temple instantáneo en agua y permite una tasa de enfriamiento más lenta para producir una estructura martensítica.

En la tabla 9.12 se incluyen las composiciones químicas, las propiedades mecánicas típicas y las aplicaciones de aceros inoxidables martensíticos de los tipos 410 y 440 C. El acero inoxidable 410 con 12 por ciento de Cr es un acero inoxidable martensítico de más baja dureza y uno de los tipos de propósito general termotratables que se utilizan para aplicaciones tales como partes de maquinarias, flechas de las bombas, pernos y boquillas.

Cuando el contenido de carbono de las aleaciones Fe-Cr se incrementa hasta casi 1% C, el bucle α se agranda. En consecuencia, las aleaciones Fe-Cr con casi 1% C pueden contener alrededor de 16 por ciento de Cr y seguir siendo capaces de producir una estructura martensítica al ser austenitizados y templados instantáneamente. La aleación tipo 440C con 16 por ciento de Cr y 1 por ciento de C es el acero inoxidable martensítico de más alta dureza entre todos los aceros resistentes a la corrosión. Su elevada dureza se debe a una matriz martensítica dura y a la presencia de una gran concentración de carburos primarios, como se muestra en la microestructura del acero 440C en la figura 9.57.

9.7.3 Aceros inoxidables austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos son en esencia aleaciones ternarias de hierro-cromo-níquel que contienen entre 16 y 25 por ciento de Cr y de 7 a 20 por ciento de Ni.

Estas aleaciones se llaman *austeníticas* porque su estructura sigue siendo de ese tipo (ccc, tipo hierro γ) en todas las temperaturas normales del tratamiento térmico. La presencia del níquel, que tiene una estructura cristalina ccc, permite que dicha estructura se mantenga a la temperatura ambiente. La alta moldeabilidad de los aceros inoxidables austeníticos se debe a su estructura cristalina ccc. En la tabla 9.12 se presenta la composición química, las propiedades mecánicas típicas y las aplicaciones de los aceros inoxidables austeníticos tipos 301, 304 y 347.

Estos aceros tienen normalmente mayor resistencia a la corrosión que los de tipo ferrítico y martensítico porque los carburos pueden conservarse en solución sólida mediante el enfriamiento rápido a partir de altas temperaturas. Sin embargo, si esas aleaciones se soldaran o enfriaran lentamente a partir de altas temperaturas en el rango de 870 a 600°C, pueden volverse susceptibles a la corrosión intergranular porque los carburos que contienen cromo se precipitan en los límites del grano. Esta dificultad se puede evitar hasta cierto punto si se reduce el contenido máximo de carbono en la aleación a cerca de 0.03% C (aleación tipo 304L) o si se agrega un elemento de aleación como el columbio (niobio) (aleación tipo 347) para que se combine con el carbono de la aleación (véase la sección 12.5 sobre corrosión intergranular). En la figura 9.58 se muestra la microestructura de un acero inoxidable tipo 304 que ha sido recocido a 1 065°C y enfriado por aire. Observe que no hay carburos visibles en la microestructura, como en el caso del acero tipo 430 (figura 9.56) y el acero tipo 440C (figura 9.57).

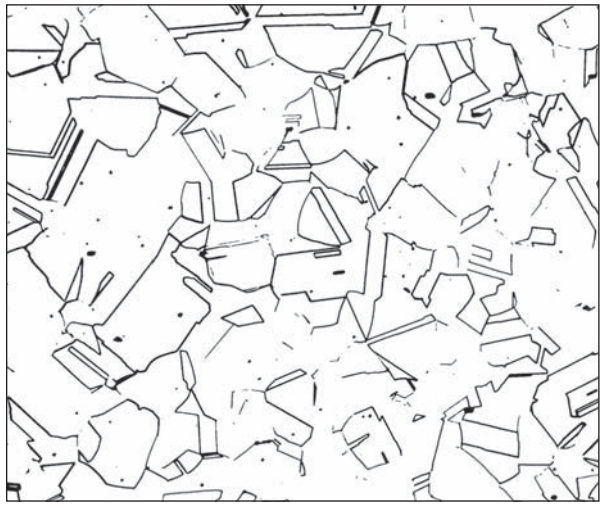


Figura 9.58
Acero inoxidable (austenítico) tipo 304 recocido 5 min a 1 065°C (1 950°F) y enfriado por aire. La estructura consiste en granos de austenita equiaxiales. Observe las maclas del recocido. (Decapante: HNO_3-acético-HCl-glicerol; amplificación 250×.)
(Cortesía de Allegheny Ludlum Steel Co.)

9.8 HIERROS FUNDIDOS

9.8.1 Propiedades generales

Son una familia de aleaciones ferrosas con amplia gama de propiedades y, como su nombre lo indica, se fabrican con la intención de ser fundidas para darles la forma deseada, en lugar de ser trabajadas en su forma sólida. A diferencia de los aceros, que usualmente contienen menos de 1 por ciento de carbono, los hierros fundidos contienen normalmente entre 2 y 4 por ciento de carbono y de 1 a 3 por ciento de silicio. También otros elementos de aleación pueden estar presentes para controlar o modificar ciertas propiedades.

Los hierros fundidos forman excelentes aleaciones para vaciar porque pueden fundirse con facilidad, son muy fluidos en estado líquido y no forman películas superficiales indeseables durante el vertido. Los hierros fundidos se solidifican con una contracción entre leve y moderada durante la colada y el enfriamiento. Estas aleaciones tienen amplio rango de resistencia y dureza y, en la mayoría de los casos, son fáciles de maquinar. Pueden alearse para obtener cualidades superiores en términos de desgaste, abrasión y resistencia a la corrosión. Sin embargo, los hierros fundidos tienen valores de resistencia al impacto y ductilidad relativamente bajos, y esto limita su uso para algunas aplicaciones. La amplia aplicación industrial de los aceros fundidos se debe sobre todo a su costo relativamente bajo y a sus versátiles propiedades de ingeniería.

9.8.2 Tipos de hierros fundidos

Se pueden distinguir cuatro tipos diferentes de hierros fundidos por la distribución del carbono en sus microestructuras: **hierro blanco**, **gris**, **maleable** y **dúctil**. Los *hierros fundidos de alta aleación* constituyen un quinto tipo de hierro fundido. Sin embargo, debido a que las composiciones químicas de los hierros fundidos se sobreponen, no es posible distinguir unos de otros mediante el análisis de su composición química. En la tabla 9.13 se enlistan los rangos de la composición química de los cuatro hierros fun didos básicos, y en la tabla 9.14 se presentan algunas de sus propiedades mecánicas de tensión típicas y sus aplicaciones.

9.8.3 Hierro fundido blanco

El hierro fundido blanco se forma cuando durante la solidificación gran parte del carbono de un hierro colado derretido forma carburo de hierro en lugar de grafito. La microestructura del hierro fundido tosco no aleado contiene grandes cantidades de car-

Tabla 9.13 Rangos de la composición química de hierros fundidos no aleados típicos

Elemento	Hierro gris (%)	Hierro blanco (%)	Hierro maleable (blanco fundido) (%)	Hierro dúctil (%)
Carbono	2.5-4.0	1.8-3.6	2.00-2.60	3.0-4.0
Silicio	1.0-3.0	0.5-1.9	1.10-1.60	1.8-2.8
Manganeso	0.25-1.0	0.25-0.80	0.20-1.00	0.10-1.00
Azufre	0.02-0.25	0.06-0.20	0.04-0.18	0.03 máx
Fósforo	0.05-1.0	0.06-0.18	0.18 máx	0.10 máx

Fuente: C.F. Walton (ed.), *Iron Castings Handbook*, Iron Castings Society, 1981.

Tabla 9.14 Propiedades mecánicas típicas y aplicaciones de los hierros fundidos

Nombre y número de la aleación	Composición química (% en peso)	Estado	Microestructura	Resistencia a la tensión		Límite elástico		Elongación (%)	Aplicaciones típicas
				ksi	MPa	ksi	MPa		
Hierros fundidos grises									
Ferrítica (G2500)	3.4 C, 2.2 Si, 0.7 Mn	Recocido	Matriz ferrítica	26	179	...		...	Bloques de cilindros pequeños, cabezas de cilindro, placas de embrague
Perlítica (G3500)	3.2 C, 2.0 Si, 0.7 Mn	Fundido tosco	Matriz perlítica	36	252	...		...	Bloques de cilindros de camiones y tractores, cajas de cambio pesadas
Perlítica (G4000)	3.3 C, 2.2 Si, 0.7 Mn	Fundido tosco	Matriz perlítica	42	293	...		...	Forja de motores diesel
Hierros fundidos maleables									
Ferrítica (32510)	2.2 C, 1.2 Si, 0.04 Mn	Recocido	Carbono revenido y ferrita	50	345	32	224	10	Servicio de ingeniería en general con buenas propiedades de maquinado
Perlítica (45008)	2.4 C, 1.4 Si, 0.75 Mn	Recocido	Carbono revenido y perlita	65	440	45	310	8	Servicios de ingeniería en general con tolerancia dimensional específica
Martensítica (M7002)	2.4 C, 1.4 Si, 0.75 Mn	Templado y revenido	Martensita revenida	90	621	70	438	2	Partes de alta resistencia; bielas y horquillas de juntas universales
Hierros fundidos dúctiles									
Ferrítica (60-40-18)	3.5 C, 2.2 Si	Recocido	Ferrítica	60	414	40	276	18	Coladas a presión, como cuerpos de válvulas y bombas
Perlítica	3.5 C, 2.2 Si	Fundido tosco	Ferrítica-perlítica	80	552	55	379	6	Cigüeñales, engranajes y rodillos
Martensítica (120-90-02)	3.5 C, 2.2 Si	Martensítica	Templada y revenida	120	828	90	621	2	Piñones, engranajes, rodillos y tapas corredizas

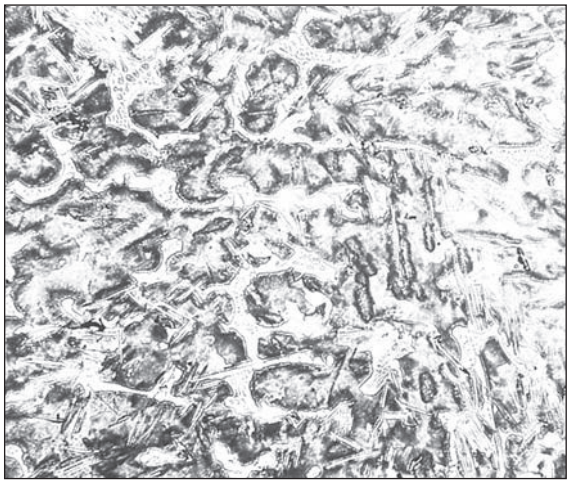


Figura 9.59
Microestructura del hierro fundido blanco. El componente blanco es carburo de hierro. Las áreas grises son de perlita no redisuelta. (Decapante: nital 2%; amplificación 100×.)
(Cortesía de Central Foundry.)

buros de hierro en una matriz perlítica (figura 9.59). Los hierros fundidos blancos reciben ese nombre por el hecho de que se fracturan y producen una superficie fracturada cristalina "blanca" o brillante. Para que los hierros fundidos blancos puedan retener el carbono en forma de carburo de hierro, su contenido de carbono y silicio se debe mantener relativamente bajo (es decir, 2.5-3.0% C y 0.5-1.5% Si) y la tasa de solidificación debe ser alta.

Los hierros fundidos blancos se usan más a menudo por su excelente resistencia al desgaste y la abrasión. La gran cantidad de carburos de hierro que hay en su estructura es la causa principal de su resistencia al desgaste. El hierro fundido blanco sirve de materia prima para fabricar hierros fundidos maleables.

9.8.4 Hierro fundido gris

El hierro fundido gris se forma cuando el carbono de la aleación rebasa la cantidad que puede disolverse en la austenita y se precipita como escamas de grafito. Cuando un trozo de hierro gris solidificado se fractura, la superficie fracturada adquiere un tono gris a causa del grafito expuesto en ella.

El hierro fundido gris es un material importante de ingeniería por su costo relativamente bajo y sus útiles propiedades para la ingeniería, como su excelente facilidad de maquinado en niveles de dureza que ofrecen buena resistencia al desgaste, la resistencia al roce por frotamiento con lubricación restringida, y excelente capacidad para amortiguar las vibraciones.

Composición y microestructura Como se enlista en la tabla 9.13, los aceros grises no aleados contienen normalmente 2.5 a 4 por ciento de C y 1 a 3 por ciento de Si. Co-

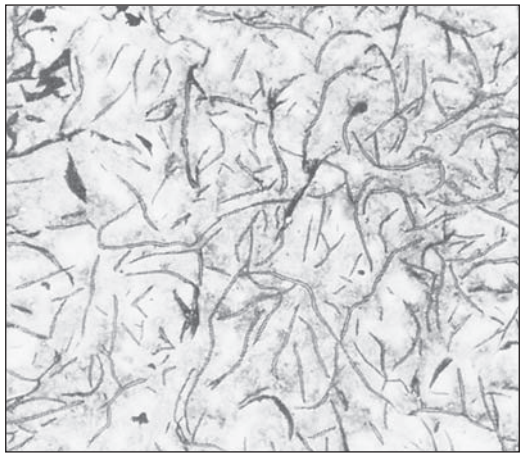


Figura 9.60
Hierro gris en fundido tosco clase 30, vaciado en un molde de arena. La estructura consiste en escamas de grafito tipo A en una matriz con 20% de ferrita libre (componente ligero) y 80% de perlita (componente oscuro). (Decapante: nital 3%; amplificación 100×.)
(Según Metal Handbook", vol. 7, 8a. ed., American Society for Metals, 1972, pág. 82.)

Figura 9.61
Micrografía electrónica de barrido de hierro gris hipereutéctico con la matriz decapada para mostrar la posición del grafito tipo B en el espacio. (Decapante: acetato de metilo-bromo líquido al 3:1; amplificación 130×.)
(Según "Metals Handbook", vol. 7, 8a. ed., American Society for Metals, 1972, pág. 82.)

mo el silicio es un elemento estabilizador del grafito en los aceros fundidos se utiliza un contenido de silicio relativamente alto para promover la formación del grafito. La velocidad de solidificación es también un factor importante que determina la cantidad en que se forma el grafito. Las velocidades moderadas de enfriamiento favorecen la formación de una matriz perlítica, en tanto que las bajas velocidades de enfriamiento promueven una matriz ferrítica. Para producir una matriz ferrítica completa en un acero gris no aleado, el hierro es sometido a un recocido el cual permite que el carbon remanente de la matriz se deposite como escamas de grafito, dejando a la matriz con una estructura totalmente ferrítica.

En la figura 9.60 se muestra la microestructura de un hierro gris no aleado, en fundido tosco, con escamas de grafito en una matriz de ferrita y perlita mezcladas. En la figura 9.61 se muestra una micrografía de barrido electrónico de un hierro gris hipereutéctico con la matriz decapada.

9.8.5 Hierros fundidos dúctiles

El hierro fundido dúctil (llamado a veces *hierro colado nodular* o *esferulítico*) combina las ventajas del procesamiento del hierro fundido gris con las ventajas de ingenieriles del acero. El hierro dúctil tiene buena fluidez y moldeabilidad, excelentes cualidades de maquinado y buena resistencia al desgaste. Además, el hierro fundido dúctil tiene varias propiedades similares a las del acero, como alta resistencia, tenacidad, ductilidad y posibilidad de ser trabajado en caliente y endurecido.

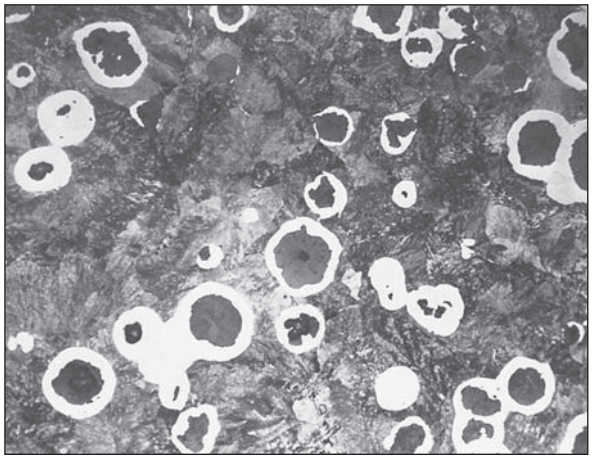


Figura 9.62
Acero dúctil perlítico grado 80-55-06 en fundido tosco. Nódulos de grafito (esferulitas) en envolturas de ferrita libre (estructura en forma de ojo de buey) en una matriz de perlita. (Decapante: nital 3%; amplificación 100×.)
(Según "Metals Handbook", vol. 7, 8a. ed., American Society for Metals, 1972, pág. 88.)

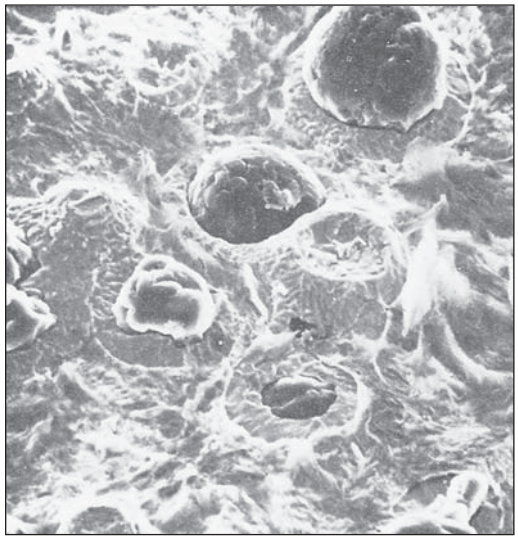


Figura 9.63
Micrografía electrónica de barrido de acero dúctil perlítico, en fundido tosco, con la matriz decapada para mostrar el grafito secundario y la ferrita en forma de ojo de buey alrededor de nódulos de grafito primarios. (Decapante: acetato de metilo-bromo líquido al 3:1; amplificación 130×.)
(Según "Metals Handbook", vol. 7, 8a. ed., American Society for Metals, 1972, pág. 88.)

Composición y microestructura Las excepcionales propiedades del acero dúctil para la ingeniería se deben a los nódulos esféricos de grafito que existen en su estructura interna, como se aprecia en las microestructuras de las figuras 9.62 y 9.63. Las regiones relativamente dúctiles de la matriz que se encuentran entre los nódulos, permiten un grado apreciable de deformación sin llegar a la fractura.

La composición del hierro dúctil no aleado es similar a la del hierro gris en lo que se refiere al contenido de carbono y silicio. Según se aprecia en la lista de la tabla 9.13, el contenido de carbono del hierro dúctil sin alear fluctúa entre 3.0 y 4.0% C y el contenido de silicio, entre 1.8 y 2.8 por ciento. No obstante, los niveles de azufre y fósforo del hierro dúctil de alta calidad se deben mantener muy bajos, en 0.03 por ciento de S como máximo y 0.1 por ciento de P como máximo, porcentajes casi 10 veces menores que los niveles máximos para el hierro fundido gris. También deben mantenerse bajos los niveles de otros elementos que se consideran impurezas porque interfieren con la formación de nódulos de granito en el hierro fundido dúctil.

Los nódulos esféricos del hierro fundido dúctil se forman durante la solidificación del hierro derretido porque los niveles de azufre y de oxígeno del hierro se han reducido a niveles muy bajos mediante la adición de magnesio al metal inmediatamente antes de fundirlo. El magnesio reacciona con el azufre y el oxígeno, por lo cual estos elementos no pueden interferir con la formación de los nódulos en forma de esferas.

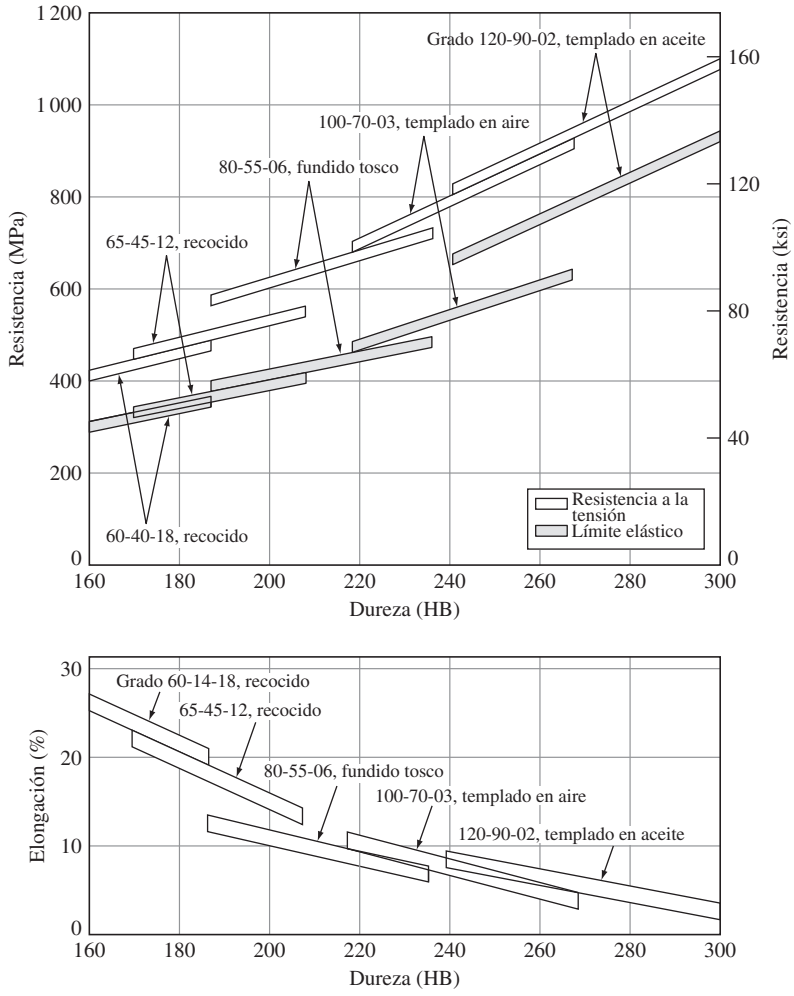


Figura 9.64
Propiedades del acero dúctil en términos de tensión *versus* dureza.
(Según "Metals Handbook", vol. 1, 9a. ed., American Society for Metals, 1978, pág. 36.)

La microestructura del hierro fundido dúctil no aleado suele ser del tipo ojo de buey que se muestra en la figura 9.62. Esta estructura consiste en nódulos de grafito "esféricos" con envolturas de ferrita libre en torno de ellos, en una matriz de perlita. Otras estructuras de fundido tosco con matrices hechas totalmente de ferrita y totalmente de perlita pueden producirse mediante la adición de elementos de aleación. También se pueden usar tratamientos térmicos subsecuentes para dosificar la estructura de ojo de buey del fundido tosco y, por lo tanto, las propiedades mecánicas del hierro fundido dúctil en estado tosco, como se ilustra en la figura 9.64.

9.8.6 Hierros fundidos maleables

Composición y microestructura Los hierros fundidos maleables se funden primero como hierros fundidos blancos que contienen grandes cantidades de carburos de hierro y no tienen grafito. Por lo tanto, la composición química de los hierros fundidos maleables se limita a las composiciones que forman hierros fundidos blancos. Como se aprecia en la lista de la tabla 9.13, los contenidos de carbono y de silicio de los hierros maleables están en los rangos de 2.0 a 2.6 por ciento de C y de 1.1 a 1.6 por ciento de Si.

Para producir una estructura de hierro maleable, el hierro fundido blanco frío se calienta en un horno de maleabilización para disociar al carburo de hierro del hierro blanco y convertirlo en grafito y hierro. El grafito del hierro fundido maleable se presenta en forma de agregados nodulares irregulares que recibe el nombre de *carbono revenido*. En la figura 9.65 se ilustra la microestructura de un hierro fundido maleable ferrítico donde puede verse el carbón revenido en una matriz de ferrita.

Los hierros fundidos maleables son materiales importantes de ingeniería porque reúnen propiedades deseables en términos de fundición, maquinado, una moderada resistencia, tenacidad, y resistencia a la corrosión en ciertas aplicaciones y uniformidad, ya que todas las piezas fundidas reciben tratamiento térmico.

Tratamiento térmico El tratamiento térmico de los hierros blancos para producir hierros maleables se realiza en dos etapas:

1. *Grafitización*. En esta etapa, el hierro blanco fundido se calienta por arriba de la temperatura eutectoide, generalmente a casi 940°C (1 720°F), y así se mantiene

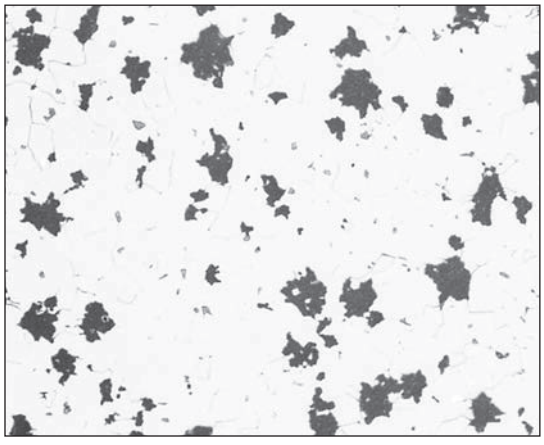


Figura 9.65
Microestructura del hierro fundido maleable ferrítico (grado M3210), recocido en dos etapas manteniéndolo 4 h a 954°C (1 750°F), enfriándolo a 704°C (1 300°F) en 6 h y enfriándolo con aire. Nódulos de grafito (carbón revenido) en una matriz de ferrita granular. (Decapante: nital 2%; amplificación 100×.)
(Según "Metals Handbook", vol. 7, 8a. ed., American Society for Metals, 1972, pág. 95.)

entre 3 y 20 h según la composición, estructura y tamaño de los vaciados. En esta etapa, el carburo de hierro del hierro blanco se transforma en carbón revenido (grafito) y austenita.

2. *Enfriamiento*. En esta etapa, la austenita del hierro se puede transformar en tres tipos básicos de matrices: ferrita, perlita o martensita.

Hierro maleable ferrítico. Para producir una matriz de ferrita, el metal fundido, después del calentamiento de la primera etapa, se enfría con rapidez entre 740 y 760°C (1 360 a 1 400°F) y luego se enfría lentamente a razón de 3 a 11°C (5 a 20°F) por hora. Durante el enfriamiento, la austenita se transforma en ferrita y grafito, este último se deposita en las partículas ya existentes de carbono revenido (figura 9.65).

Hierro maleable perlítico. Para producir este hierro, el material fundido se enfría lentamente hasta casi 870°C (1 600°F) y luego se enfría con aire. En este caso, el temple instantáneo transforma la austenita en perlita; de esto resulta un hierro maleable perlítico, que consiste en nódulos de carbono revenido en una matriz de perlita.

Hierro maleable martensítico revenido. Este tipo de hierro maleable se produce enfriando en el horno el material fundido hasta una temperatura de templado de 845 a 870°C (1 550 a 1 600°F), manteniéndolo así entre 15 y 30 min para dejar que se homogeinice por completo, y templándolo en aceite con agitación para desarrollar una matriz martensítica. Finalmente, el material fundido se reviene a una temperatura entre 590 y 725°C (1 100 a 1 340°F) para que adquiera las propiedades mecánicas especificadas. Por tanto, la microestructura final consiste en nódulos de carbono revenido en una matriz martensítica revenida.

9.9 ALEACIONES DE MAGNESIO, TITANIO Y NÍQUEL

9.9.1 Aleaciones de magnesio

El magnesio es un metal ligero (densidad = 1.74 g/cm^3) y compite con el aluminio (densidad = 2.70 g/cm^3) en las aplicaciones que exigen metales de baja densidad. Sin embargo, el magnesio y sus aleaciones tienen muchas desventajas que limitan su uso generalizado. En primer lugar, el magnesio cuesta más que el aluminio ($3.29/lb de Mg comparado con $0.67/lb de Al en 2001, véase la tabla 9.1). El magnesio es difícil de fundir porque en su estado fundido se quema en el aire y es necesario usar fundentes protectores durante el vaciado. Además, las aleaciones de magnesio tienen resistencia relativamente baja y poca resistencia a la fluencia, la fatiga y el desgaste. Además, el magnesio tiene estructura cristalina hc, lo cual dificulta la deformación a temperatura ambiente porque sólo están disponibles tres sistemas importantes de deslizamiento. Por otra parte, a causa de su densidad tan baja, las aleaciones de magnesio se usan provechosamente para aplicaciones aeroespaciales y equipo de manejo de materiales, por ejemplo. En la tabla 9.15 se comparan algunas propiedades físicas y costos del magnesio con los de otros metales de ingeniería.

Clasificación de las aleaciones de magnesio Existen dos tipos principales de aleaciones de magnesio: *aleaciones forjadas*, principalmente en forma de láminas, placas, extrusiones y piezas forjadas, y *aleaciones fundidas*. Ambos tipos tienen calidades termotratables y no termotratables.

Las aleaciones de magnesio suelen designarse mediante dos letras mayúsculas seguidas de dos o tres números. Las letras representan a los dos principales elementos

Tabla 9.15 Algunas propiedades físicas y costos de varios metales de ingeniería

Metal	Densidad a 20°C (g/cm^3)	Punto de fusión (°C)	Estructura cristalina	Costo ($/lb)(1989)
Magnesio	1.74	651	HC	1.63
Aluminio	2.70	660	CC	0.96
Titanio	4.54	1 675	HC ⇌ CC*	5.25-5.50‡
Níquel	8.90	1 453	CC	7
Hierro	7.87	1 535	CC ⇌ CC†	0.20
Cobre	8.96	1 083	CC	1.45

*La transformación ocurre a 883°C.
†La transformación ocurre a 910°C.
‡Esponja de titanio. El precio corresponde a 50 toneladas aproximadamente.

que intervienen en la aleación, la primera letra corresponde al que está presente en más alta concentración y la segunda aquel cuya concentración ocupa el segundo lugar. El primer número después de las letras representa el porcentaje en peso del elemento indicado por la primera letra (si hay solamente dos números) y el segundo número representa el porcentaje en peso del elemento correspondiente a la segunda letra. Si una letra A, B, etc., aparece después de los números, eso indica que ha habido una modificación A, B, etc. en la aleación. Las siguientes letras se usan como símbolos para indicar los elementos aleados con el magnesio:

A = aluminio	K = circonio	M = manganeso
E = tierras raras	Q = plata	S = silicio
H = torio	Z = zinc	T = estaño

Las nomenclaturas del templado para las aleaciones de magnesio son las mismas que se usan para aleaciones de aluminio y se indican en forma de lista en la sección 9.5.

PROBLEMA DE EJEMPLO 9.7

Explique el significado de las designaciones de las aleaciones de magnesio *a*) HK31A-H24 y *b*) ZH62A-T5.

■ Solución

a) La designación HK31A-H24 significa que la aleación del magnesio contiene 3% nominal en peso de torio y 1% en peso de circonio y que la aleación es la modificación A. La designación H24 significa que la aleación se laminó en frío y se volvió a recocer parcialmente hasta darle un templado de mediana dureza.

b) La designación ZH62A-T5 significa que la aleación de magnesio contiene 6% nominal en peso de zinc y 2% en peso de torio y es la modificación A. T5 significa que la aleación se envejeció artificialmente después de fundida.

Estructura y propiedades El magnesio tiene la estructura cristalina hc y, por lo tanto, las aleaciones de magnesio sólo pueden trabajarse en frío de manera limitada. Cuando el magnesio está a altas temperaturas, algunos planos de deslizamiento diferentes de los basales se vuelven activos. Por lo tanto, las aleaciones de magnesio suelen trabajarse en caliente, en vez de en frío.

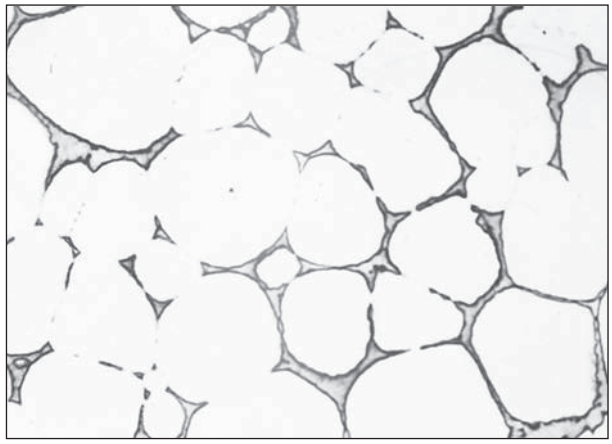


Figura 9.66
Microestructura de la aleación de magnesio EZ33A en estado de fundido tosco que muestra una red masiva de límites de grano del compuesto Mg_9R (tierra rara). (Decapante: glicol; amplificación 500×.)
(Cortesía de la Dow Chemical Co.)

El aluminio y el zinc forman comúnmente aleaciones con el magnesio para formar aleaciones de magnesio forjado. Ambos aumentan la resistencia del magnesio mediante el endurecimiento en solución sólida. El aluminio se combina también con el magnesio para formar el precipitado $Mg_{17}Al_{12}$, que puede usarse para endurecer por envejecimiento aleaciones Mg-Al. El torio y el circonio forman también precipitados en magnesio; se usan para aleaciones que pueden utilizarse a altas temperaturas de hasta 427°C (800°F) aproximadamente.

Las aleaciones de fundición de magnesio se fabrican con aluminio y zinc porque esos elementos favorecen el endurecimiento por solución sólida. Cuando se hace una aleación de magnesio con metales de tierras raras, sobre todo con cerio, se produce una red de límites de grano rígida, como se muestra en la figura 9.66. En la tabla 9.16 se resumen las propiedades mecánicas y las aplicaciones típicas de algunas aleaciones de magnesio forjadas y fundidas.

9.9.2 Aleaciones de titanio

El titanio es un metal relativamente ligero (densidad = 4.54 g/cm^3) pero tiene alta dureza (96 ksi para el Ti 99.0%), por lo cual el titanio y sus aleaciones compiten favorablemente con las aleaciones de aluminio en algunas aplicaciones aeroespaciales, aun cuando el titanio cuesta mucho más ($3.85/lb por el Ti[8] frente a $0.67/lb por el Al en 2001, véase la tabla 9.1). También se usa en aplicaciones por su excelente resistencia a la corrosión en muchos ambientes químicos, como las soluciones de cloro y las de cloruro inorgánico.

[8] Esponja de titanio en cantidades de 50 toneladas aproximadamente.

Tabla 9.16 Propiedades mecánicas típicas y aplicaciones de algunas aleaciones de magnesio, titanio y níquel

Nombre y número de la aleación	Composición química (% en peso)	Estado*	Resistencia a la tensión		Límite elástico		Elongación (%)	Aplicaciones típicas
			ksi	MPa	ksi	MPa		
Aleaciones forjadas de magnesio								
AZ31B	3 Al, 1 Zn, 0.2 Mn	Recocido	32	228	...	...	11	Equipo aéreo para transportar; carga; anaqueles y estantes
		H24	36	248	23	159	7	
HM21A	2 Th, 0.8 Mn	T8	32	228	20	138	6	Lámina y placa para usarse en misiles y aviones hasta a 800°F (427°C)
ZK60	6 Zn, 0.5 Zr	T5	45	310	34	235	5	Usos aeroespaciales sometidos a altas tensiones; extrusiones y forjas
Aleaciones forjadas de magnesio								
AZ63A	6 Zn, 3 Al, 0.15 Mn	Fundido tosco	26	179	11	76	4	Vaciados en arena que necesitan buen endurecimiento a temperatura ambiente
		T6	34	235	16	110	3	
EZ33A	3 RE, 3 Zn, 0.7 Zr	T5	20	138	14	971	2	Vaciados en arena empacada a presión y en moldes permanentes realizadas a 350-500°F (150-260°C)
Aleaciones de titanio								
	99.0% Ti (estructura α)	Recocido	96	662	85	586	20	Usos químicos y marítimos; partes de fuselajes y motores de aviones
	Ti-5 Al-2 Sn (estructura α)	Recocido	125	862	117	807	16	Aleaciones soldables para partes forjadas y de lámina de metal
Aleaciones de níquel								
Nickel 200	99.5 Ni	Recocido	70	483	22	152	48	Procesamiento químico y de alimentos, partes electrónicas
Monel 400	66 Ni, 32 Cu	Recocido	80	552	38	262	45	Procesamiento químico y de aceite; servicio marítimo
Monel K500	66 Ni, 30 Cu, 2.7 Al, 0.6 Ti	Endurecido por envejecimiento	150	1 035	110	759	25	Válvulas, bombas, resortes, collares de perforación para pozos petrolíferos

*H24 = trabajado en frío y parcialmente recocido, de mediana dureza; T5 = endurecido por envejecimiento; T6 = tratado térmicamente en solución y envejecido; T8 = tratado térmicamente en solución, trabajado en frío y endurecido por envejecimiento.

El metal titanio es caro porque resulta difícil extraerlo en estado puro a partir de sus compuestos. A altas temperaturas, el titanio se combina con oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, carbono y hierro, por lo cual es necesario emplear técnicas especiales para fundirlo y para trabajar el metal.

El titanio tiene una estructura cristalina hc (alfa) a temperatura ambiente, la cual se transforma en la estructura cc (beta) a 883°C. Elementos como el aluminio y el oxígeno estabilizan la fase α e incrementan la temperatura a la cual la fase α se transforma en la fase β. Otros elementos, como el vanadio y el molibdeno, estabilizan la fase β y reducen la temperatura a la cual la fase β es estable. Existen otros elementos, como el cromo y el hierro, que reducen la temperatura de transformación a la cual la fase β es estable y ocasionan una reacción eutectoide que produce una estructura de dos fases a temperatura ambiente.

En la tabla 9.16 se enlistan las propiedades mecánicas y las aplicaciones típicas del titanio comercialmente puro (99.0 por ciento de Ti) y de varias aleaciones de titanio. La aleación Ti-6 Al-4 V es la aleación de titanio de uso más generalizado porque combina alta dureza con la cualidad de ser trabajable. La resistencia a la tensión de esta aleación en estado tratado térmicamente en solución y envejecido alcanza los 170 ksi (1 173 MPa).

9.9.3 Aleaciones de níquel

El níquel es un metal importante de ingeniería sobre todo por su excepcional resistencia a la corrosión y a la oxidación a alta temperatura. El níquel tiene también la estructura cristalina ccc, lo que lo hace sumamente moldeable, pero es relativamente caro ($7/lb en 1989) y tiene alta densidad (8.9 g/cm^3), lo que limita su uso.

Aleaciones comerciales de níquel y Monel El níquel comercialmente puro se usa para fabricar partes eléctricas y electrónicas debido a su buena dureza y conductividad eléctrica, y por su buena resistencia a la corrosión, también se utiliza en equipo para procesamiento de alimentos. El níquel y el cobre son totalmente solubles uno en el otro en todas sus composiciones, cuando están en estado sólido, por lo cual muchas aleaciones endurecidas por solución sólida se fabrican con níquel y cobre. El níquel forma una aleación con el cobre al 32 por ciento aproximadamente para producir la aleación Monel 400 (tabla 9.16), la cual tiene una dureza relativamente alta, es apta para soldaduras y tiene excelente resistencia a la corrosión en muchos ambientes. El cobre al 32 por ciento endurece al níquel de manera limitada y reduce su costo. La adición de 3 por ciento de aluminio y 0.6 por ciento de titanio aumenta apreciablemente la dureza del Monel (66% Ni-30% Cu) mediante el endurecimiento por precipitación. Los precipitados del endurecimiento son, en este caso, Ni_3Al y Ni_3Ti.

Superaleaciones a base de níquel Se ha creado todo un espectro de superaleaciones a base de níquel, en especial para fabricar partes de turbinas de gas que deben ser capaces de resistir temperaturas elevadas y altas condiciones de oxidación, además de ser resistentes a la termofluencia. La mayoría de las superaleaciones a base de níquel forjado contienen entre 50 y 60 por ciento de níquel, de 15 a 20 por ciento de cromo y entre 15 y 20 por ciento de cobalto aproximadamente. Se añaden pequeñas cantidades de aluminio (1 a 4 por ciento) y titanio (2 a 4 por ciento) para el endurecimiento por precipitación. Las superaleaciones a base de níquel consisten esencialmente en tres fases principales: (1) una matriz de austenita gamma, (2) una fase de precipitado

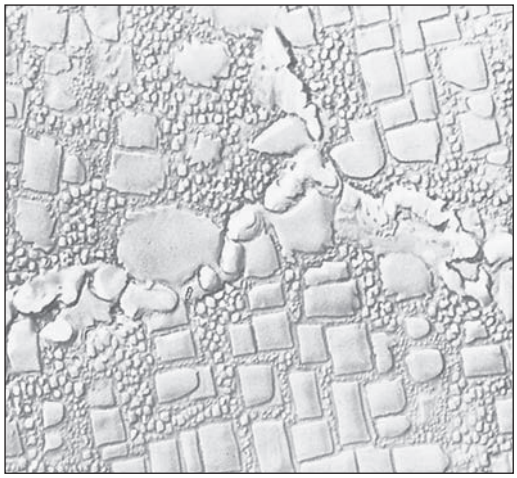


Figura 9.67
Forja de astrología, solución tratada térmicamente 4 h a 1 150°C, enfriada en aire, envejecida a 1 079°C durante 4 h, templada en aceite, envejecida a 843°C durante 4 h, enfriada por aire, envejecida a 760°C durante 16 h, enfriada por aire. La gamma prima intergranular precipitada a 1 079°C, la gamma prima fina a 843 y 760°C. Las partículas de carburo se encuentran también en los límites de grano. La matriz es gamma. (Electrolítico: H_2SO_4, H_3PO_4, HNO_3; amplificación 10 000×.)
(Según "Metals Handbook", vol. 7, 8a. ed., American Society for Metals, 1972, pág. 171.)

de Ni_3Al y Ni_3Ti llamada *gamma prima* y (3) partículas de carburo (debido a la adición entre 0.01 y 0.04 por ciento de C). La gamma prima imparte a estas aleaciones resistencia y estabilidad a temperaturas altas, y los carburos estabilizan los límites de grano a altas temperaturas. En la figura 9.67 se muestra la microestructura de las de superaleaciones a base de níquel después del tratamiento térmico. En esta micrografía la gamma prima y las partículas de carburo son claramente visibles.

9.10 ALEACIONES PARA PROPÓSITOS ESPECIALES Y SUS APLICACIONES

9.10.1 Intermetálicos

Las aleaciones intermetálicas (véase la sección 8.10) constituyen una clase de materiales metálicos que tienen combinaciones de propiedades únicas que son atractivas para muchas industrias. Algunos ejemplos de intermetálicas estructurales de alta temperatura que han atraído mucha atención en las aplicaciones aeronáuticas y de motores jet son los aluminuros de níquel (Ni_3Al y NiAl), los aluminuros de hierro (Fe_3Al

y FeAl) y los aluminuros de titanio (Ti_3Al y TiAl). Este tipo de aleaciones contienen aluminio: el aluminio puede formar una delgada capa pasiva de alúmina (Al_2O_3) en un ambiente oxidante que sirve para proteger la aleación contra daños causados por la corrosión. Las densidades de las intermetálicas son bajas, en comparación con otras aleaciones de alta temperatura, como las superaleaciones de níquel, por lo cual son más adecuadas para las aplicaciones aeroespaciales. Estas aleaciones tienen también puntos de fusión relativamente altos y buena resistencia a altas temperaturas. El factor que ha limitado la aplicación de esos metales es su naturaleza frágil a la temperatura ambiente. Algunos aluminuros, por ejemplo el Fe_3Al, se muestran también frágiles frente al entorno a temperatura ambiente. El que se vuelvan frágiles se debe a que el vapor de agua del medio ambiente reacciona con ciertos elementos, como el aluminio, para formar hidrógeno atómico, el cual se difunde en el metal y provoca una reducción de la ductilidad y fracturas prematuras.

El aluminuro Ni_3Al es de especial interés por su solidez y su resistencia a la corrosión a altas temperaturas. Este aluminuro se ha usado también como un componente finamente disperso en las superaleaciones a base de níquel para incrementar la dureza de las aleaciones. La adición de 0.1 por ciento en peso de boro a Ni_3Al (con menos de 25 por ciento en peso de Al) ha demostrado la capacidad de eliminar la fragilidad de la aleación; de hecho, dicha adición mejora la ductilidad hasta en 50 por ciento al reducir la fragilidad a causa del hidrógeno. Estas aleaciones muestran también una anomalía interesante y útil que consiste en que su límite elástico se incrementa al aumentar la temperatura. Además de boro, se añaden de 6 a 9% en peso de Cr a la aleación para reducir la fragilidad causada por el ambiente a altas temperaturas; el Zr se añade para mejorar la dureza mediante el endurecimiento en solución sólida; y el Fe se agrega para mejorar su aptitud para la soldadura. La adición de cada impureza hace más complejo el diagrama y el análisis de fases subsiguiente. Además de las aplicaciones en motores para avión, este material intermetálico se usa para hacer partes de hornos, sujetadores de aeronáutica, pistones y válvulas, así como herramientas. Sin embargo, las aplicaciones de los materiales intermetálicos no se limitan a los usos estructurales. Por ejemplo, se ha desarrollado Fe_3Si para aplicaciones magnéticas por sus excelentes propiedades magnéticas y su resistencia al desgaste; se ha usado al $MoSi_2$ para fabricar elementos de calentadores eléctricos en hornos de alta temperatura por su alta conductividad eléctrica y térmica; y el NiTi (mitinol) se usa como aleación con memoria de forma en aplicaciones médicas.

9.10.2 Aleaciones con memoria de forma

Propiedades y características generales Las **aleaciones con memoria de forma** (SMA) tienen la capacidad de recobrar una forma previamente definida cuando se les somete al procedimiento de tratamiento térmico apropiado. Al volver a su forma original, estos materiales también pueden aplicar fuerzas. Varias aleaciones metálicas exhiben ese comportamiento, entre ellas las de Au-Cd, Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni y Ni-Ti. La mayoría de las aplicaciones prácticas corresponden a las SMA que tienen la capacidad de recuperarse tras una cantidad significativa de deformación (superelasticidad) o las que pueden aplicar grandes fuerzas al adoptar de nuevo su forma original.

Producción de SMA y mecánica de su comportamiento La aleación SMA puede procesarse utilizando técnicas de moldeo en caliente y en frío, como el forjado, el laminado, la extrusión y el estiraje trefilado de alambre para producir cintas, tubos,

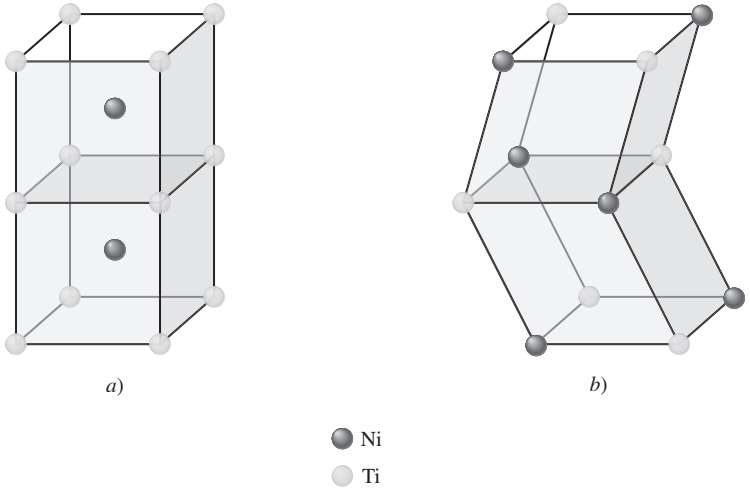
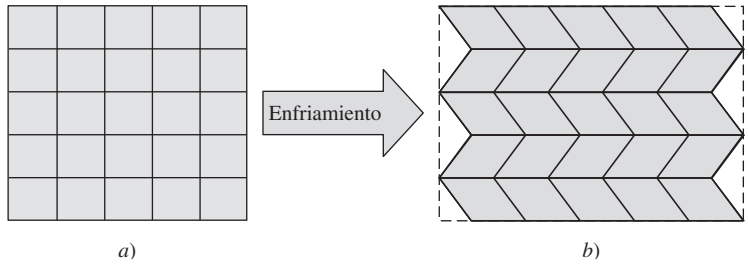


Figura 9.68
Estructuras en una aleación Ni-Ti: *a*) austenítica y *b*) martensítica.

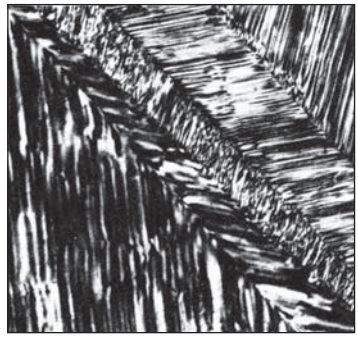
alambres, láminas o resortes. Para impartirle la memoria de forma deseada, la aleación se trata térmicamente en un rango de temperaturas de 500 a 800°C. Durante el proceso de tratamiento térmico, la SMA se mantiene restringida en la forma deseada. A esta temperatura, el material tiene una estructura cúbica bien ordenada que se conoce como *austenita* (*fase generatriz*) (figura 9.68*a*). Después que el material se enfría, su estructura cambia y se vuelve una estructura de laminillas, sumamente entretejidas o dispuestas en cortes alternados, llamada *martensita* (figura 9.68*b*). La estructura cortada en forma alternativa, es decir, en cortes opuestos consecutivos, conserva la forma general del cristal, como se muestra en la figura 9.69 (la microestructura real se ilustra en la figura 9.69*c*).

El efecto por el cual las SMA recuperan su forma es resultado de la transformación de fase sólida-sólida entre dos estructuras materiales, es decir, la austenita y la martensita. En el estado de martensita, una SMA es muy fácil de deformar mediante la aplicación de tensiones, en virtud de la propagación del contorno de la macla (figura 9.70). Si en esta etapa se elimina la carga, la deformación de la martensita persiste, lo cual le da la apariencia de una deformación plástica. Sin embargo, después de ser deformada en el estado martensítico, el calentamiento provoca una transformación de la martensita en austenita, con lo cual el componente recupera su forma original (figura 9.71). El cambio de estructura no se produce con pequeñas variaciones de temperatura, sino sobre un rango de temperaturas que depende del sistema de aleación, como se muestra esquemáticamente en la figura 9.72. Durante el enfriamiento, la transformación comienza en M_s (100 por ciento de austenita) y termina en M_f (0 por ciento de martensita), mientras que en el calentamiento, la transformación comienza en A_s (100 por ciento de martensita) y termina en A_f (0 por ciento de martensita). Además, las transformaciones durante el enfriamiento y el calentamiento no se sobreponen, es decir, el sistema exhibe el fenómeno de *histéresis* (figura 9.72).

Cuando una aleación SMA está a una temperatura más alta que A_f (100 por ciento austenita), la fuerza aplicada puede deformarla y transformarla en un estado mar-

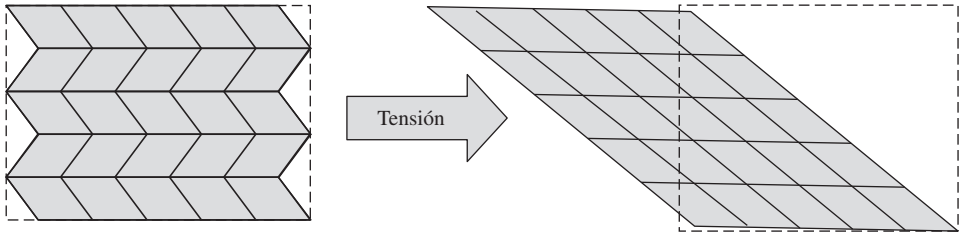


a) *b*)



c)

Figura 9.69
La transformación de austenita en martensita mediante enfriamiento conserva la forma general del cristal. *a*) Cristal de austenita, *b*) martensita altamente maclada y *c*) martensita que muestra una estructura cortada en forma alternante.
(Según "Metals Handbook", 2a. ed., ASM International, 1998.)



a) *b*)

Figura 9.70
Deformación de la estructura de martensita a causa de la aplicación de una fuerza. *a*) Martensita maclada y *b*) martensita deformada.

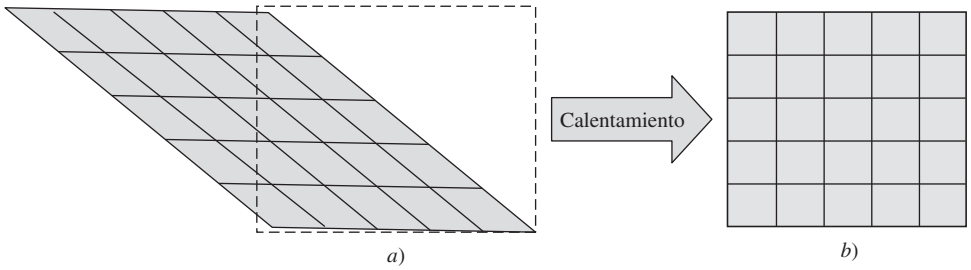


Figura 9.71
La martensita deformada se transforma en austenita al calentarla. *a*) Martensita deformada y *b*) austenita.

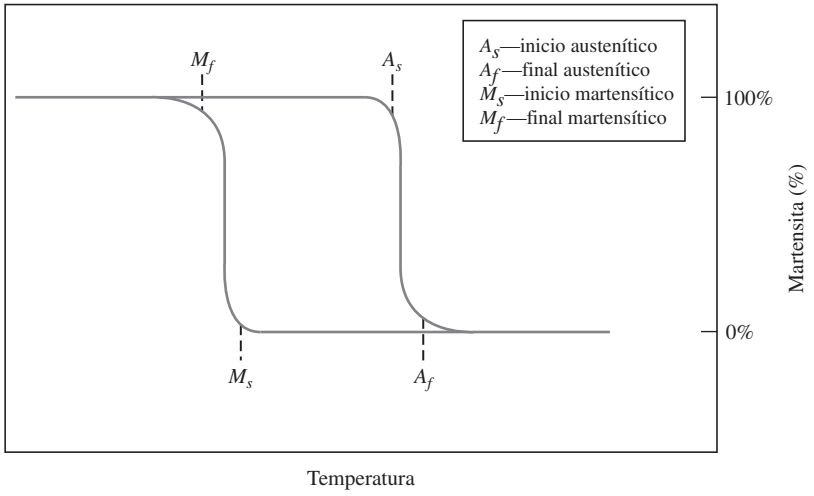


Figura 9.72
Diagrama típico de transformación-temperatura para un espécimen sometido a tensión al ser calentado y enfriado.

tensítico. Si en este punto se retira la carga, la fase martensítica se vuelve termodinámicamente inestable (debido a la alta temperatura) y recupera su estructura y forma originales de manera elástica. Ésta es la base del comportamiento superelástico de las SMA. En virtud de que la transformación se logró a temperatura constante y bajo carga, se dice que ha sido *inducida por esfuerzo*.

Aplicaciones de las SMA El Ni-Ti "nitonol" intermetálico es una de las aleaciones SMA que se usan más comúnmente en un rango de composiciones de determinado porcentaje de Ni-49 en peso de Ti a un porcentaje de Ni-51 en peso de Ti. El nitonol tiene una memoria de forma bajo tensión de 8.5 por ciento aproximadamente, no es magnético, tiene excelente resistencia a la corrosión y mayor ductilidad que otras SMA (véase la tabla 9.17). Sus aplicaciones incluyen dispositivos de accionamiento en los que el

Tabla 9.17 Algunas propiedades del nitonol

Propiedades	Valor de la propiedad
Temperatura de fusión, °C (°F)	1 300 (2370)
Densidad, g/cm^3 (lb/pulg^3)	6.45 (0.233)
Resistividad, $\mu\Omega \cdot$ cm	
Austenita	~100
Martensita	~70
Conductividad térmica, W/m · °C (Btu/pie · h · °F)	
Austenita	18 (10)
Martensita	8.5 (4.9)
Resistencia a la corrosión	Similar al acero inoxidable serie 300 o a aleaciones de titanio
Módulo de Young, GPa (10^6 psi)	
Austenita	~83 (~12)
Martensita	~28-41 (~4–6)
Límite elástico, MPa (ksi)	
Austenita	195-690 (28-100)
Martensita	70-140 (10-20)
Carga de ruptura por tensión, MPa (ksi)	895 (130)
Temperaturas de transformación, °C (°F)	−200 a 110 (−325 a 230)
Histéresis, Δ°C (Δ°F)	~30 (~55)
Calor latente de transformación, kJ/kg · atom (cal/g · atom)	167 (40)
Memoria de forma bajo esfuerzo	8.5% máximo

Fuente: Metals Handbook, 2a. ed., ASM International, 1998.

material (1) tiene la capacidad de recuperar libremente su forma original, (2) está totalmente contraído, por lo cual cuando recupera su forma ejerce una fuerza considerable sobre la estructura que la mantenía contraída, o (3) está parcialmente contraída por el material deformable circundante, en cuyo caso la SMA realiza un trabajo. Algunos ejemplos prácticos de dispositivos de accionamientos son: los *stents* vasculares, termostatos de cafetera y acoplamientos para tubos hidráulicos. Otros componentes, como armazones para anteojos y alambres para frenos de ortodoncia son ejemplos en los que la superelasticidad del material es la propiedad deseada. Además, la fase martensítica tiene excelente capacidad de absorción de energía y gran resistencia a la fatiga, debido a su estructura maclada. Así, la fase martensítica se usa como amortiguador de vibraciones y en instrumentos quirúrgicos flexibles para cirugía de corazón con tórax abierto. Claro está que al seleccionar esos materiales para aplicaciones específicas hay que tener presente cuáles son las temperaturas en que van a operar, en comparación con las temperaturas de su transformación.

9.10.3 Metales amorfos

Propiedades y características generales En general, los términos *amorfo* y *metal* parecen ser de índole contradictoria. En los capítulos anteriores, cuando se presentaron los conceptos de estructura cristalina y solidificación de metales se dijo a menudo que los metales tienen alta afinidad para formar estructuras cristalinas con un orden de largo alcance. Sin embargo, como se dijo brevemente en el capítulo 3, en ciertas condiciones, hasta los metales pueden formar estructuras no cristalinas, altamente desordenadas, amorfas, de estructuras vítreas (por eso se usa el término *vidrio metálico*) en las que los átomos están dispuestos de manera aleatoria. En la figura 9.73*a* se muestra es-

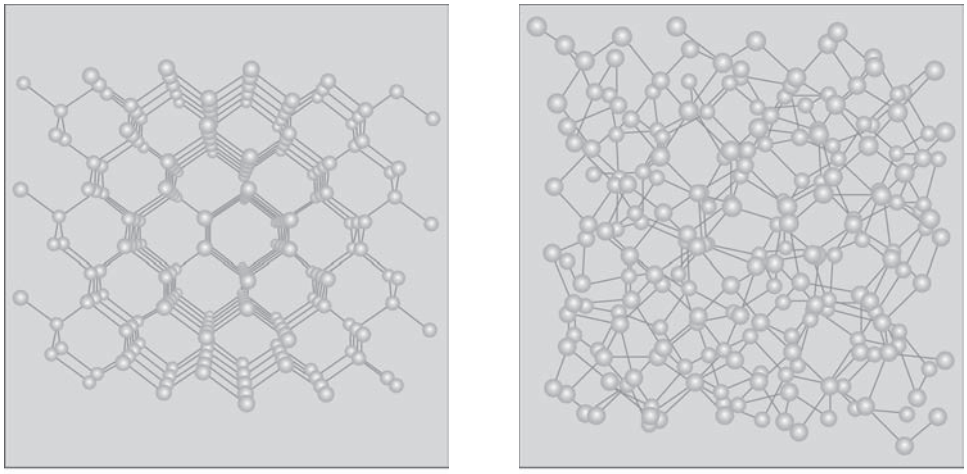


Figura 9.73
Comparación del orden atómico en *a*) una aleación cristalina a base de Zr y *b*) una aleación vítrea a base de Zr.
(http://ceramicmaterials.rutgers.edv/firstyearintro/atomictramp.pdf)

quemáticamente a un sólido cristalino (observe las características ordenadas y paralelas) y en la figura 9.73*b* se muestra la estructura atómica amorfa o vítrea. Es fácil notar la naturaleza amorfa de la aleación vítrea cuando se compara con la cristalina.

Producción de metales amorfos y mecánica de su comportamiento El concepto de metal amorfo no es nuevo y su estudio data de la década de 1960. Los metales amorfos se obtuvieron inicialmente aplicando metal fundido a una superficie que se mueve y se enfría rápidamente. El resultado es el temple rápido del metal a razón de 10^5 K/s. El proceso de templado rápido deja muy poco tiempo para que el metal fundido se solidifique. En ese breve periodo no hay oportunidad para la difusión de átomos y la formación de cristales; en consecuencia, se forma un sólido en estado vítreo. No es fácil lograr esa velocidad de templado. A causa de la mala conductividad térmica de los vidrios metálicos, sólo hasta últimas fechas se pudieron desarrollar láminas delgadas, alambres o formas pulverizadas (productos que por lo menos tienen una dimensión muy pequeña) a partir de esos materiales.

Debido a la disposición aleatoria de los átomos en los metales amorfos, las actividades de dislocación son mínimas, por lo cual los metales que se forman de esta manera son muy duros. Además, esos metales no se endurecen por deformación, sino se comportan de manera elástica, perfectamente plástica. (La porción plástica de la curva de esfuerzo de deformación es plana.) La deformación plástica en los vidrios metálicos es altamente inhomogénea y se localiza en bandas de cortadura intensa. Por tanto, la estructura, los mecanismos de deformación y las propiedades de esos metales son totalmente diferentes a las que se observan en los metales cristalinos.

Aplicaciones de los metales vítreos Recientemente ha sido posible fabricar formas de aleaciones amorfas a escala de centímetros o a granel con velocidades de enfriamiento notablemente más bajas, algunas de las cuales están disponibles comercial-

mente en la actualidad. Los nuevos descubrimientos han demostrado que si los metales con radios atómicos considerablemente diferentes, como Ti, Cu, Zr, Be o Ni se mezclan para formar una aleación, la cristalización se dificulta y el sólido resultante tiene una estructura amorfa. Cuando esas aleaciones se solidifican no se contraen considerablemente y se puede lograr una alta precisión dimensional. En consecuencia, a diferencia de los metales convencionales, estos materiales permiten producir superficies metálicas filosas, como las que se necesitan en los cuchillos e instrumentos quirúrgicos, sin necesidad de realizar procesos adicionales de afilado u operaciones de acabado. Una de las principales desventajas del vidrio metálico es su carácter metaestable, es decir, que si la temperatura se eleva hasta un nivel crítico, el metal vuelve a un estado cristalino y recupera sus características estándar.

Un ejemplo comercial de vidrio metálico es la aleación fundida Vit-001 (a base de Zr) que tiene un alto módulo de elasticidad, límite elástico elevado (1900 MPa) y es anticorrosivo. Su densidad es más alta que la del aluminio y el titanio, pero más baja que la del acero. Puede soportar una deformación recuperable de casi 2 por ciento, significativamente mayor que la de los metales convencionales. Debido a este alto límite elástico a la deformación y a su dureza, las primeras aplicaciones de los metales vítreos se registraron en las industrias del equipo deportivo, como el golf. La fabricación de cabezas más duras y elásticas para los palos de golf a partir de metal vítreo permite que la pelota llegue más lejos. Con mejores técnicas de procesamiento para producir metales amorfos a granel, el número de nuevas aplicaciones aumentará también.

9.11 METALES EN APLICACIONES BIOMÉDICAS: BIOMETALES

Los metales se usan ampliamente en muchas aplicaciones biomédicas. Ciertas aplicaciones son específicas para sustituir tejidos dañados o defectuosos a fin de restablecer una función, por ejemplo, las aplicaciones ortopédicas en las que parte o la totalidad de un hueso o articulación es sustituida o reforzada con aleaciones de metal. En las aplicaciones de odontología, los metales se usan como material de relleno para obturaciones, en tornillos de soporte para implantes dentales y como material de sustitución dental. Las aleaciones de metal, que sustituyen a los tejidos biológicos dañados, restablecen las funciones o están en contacto constante o intermitente con los fluidos corporales, se conocen colectivamente como *biomateriales*, o, como en este caso nos enfocamos en los metales, se les llama *biometales*. Claro está que los metales que se usan en instrumentos médicos, dentales y quirúrgicos, así como los metales que se usan en prótesis externas, no se clasifican como biomateriales porque no están expuestos a los fluidos corporales de manera continua o intermitente. En esta sección analizan los biometales que se usan más a menudo en aplicaciones estructuralmente importantes, como implantes y dispositivos de fijación para diversas articulaciones (como las de cadera, rodilla, hombro, tobillo o muñeca) y para los huesos del cuerpo.

Los biometales tienen características específicas que los hacen apropiados para ser aplicados en el cuerpo humano. El ambiente interno del cuerpo es altamente corrosivo y puede degradar al material implantado (ortopédico o dental), lo cual daría lugar a la liberación de moléculas o iones dañinos. Así pues, la principal característica de un biometal es su *biocompatibilidad*, la cual se define como estabilidad química, resistencia a la corrosión y no ser carcinogénico ni tóxico cuando se usa en el cuerpo humano. Una vez que la biocompatibilidad del metal ha sido establecida, la segunda característica

importante es que sea capaz de soportar tensiones grandes y variables (cíclicas) en el ambiente altamente corrosivo del cuerpo humano. La importancia de la capacidad del metal para soportar cargas puede ser apreciada si se considera que la persona promedio puede experimentar entre 1 y 2.5 millones de ciclos de tensión en su cadera cada año (a causa de sus actividades normales diarias). Esto se traduce en un total entre 50 y 100 millones de ciclos de tensión en un periodo de 50 años. Por lo tanto, el biomaterial debe ser fuerte y resistente a la fatiga y al desgaste en un ambiente altamente corrosivo. ¿Qué metales satisfacen esas condiciones?

Los metales puros como el Co, Cu y Ni son considerados tóxicos en el cuerpo humano. Por otra parte, metales puros como Pt, Ti y Zr tienen altos niveles de biocompatibilidad. Los metales como Fe, Al, Au y Ag tienen una biocompatibilidad moderada. Algunos aceros inoxidables y aleaciones de Co-Cr tienen también una compatibilidad moderada. En la práctica, los metales que se usan más a menudo en el cuerpo humano para aplicaciones que soporten cargas son los aceros inoxidables (sección 9.7), las aleaciones a base de cobalto y las aleaciones de titanio (sección 9.9.2). Estos metales tienen características aceptables en términos de biocompatibilidad y soporte de cargas; sin embargo, ninguno de ellos tiene todas las características necesarias para una aplicación específica.

9.11.1 Aceros inoxidables

En la sección 9.7 se analizaron varias clases de aceros inoxidables, entre ellos los ferríticos, martensíticos y austeníticos. En las aplicaciones ortopédicas, el acero inoxidable austenítico 316L (18 Cr, 14 Ni, 2.5 Mo-F138) es el que se usa más a menudo. Este metal tiene aceptación porque es relativamente barato y se puede moldear fácilmente con las técnicas existentes para moldear metales. El tamaño de grano ASTM apropiado es de 5 o más fino. El metal se usa con frecuencia en el estado trabajado en frío a 30 por ciento para mejorar su elasticidad, resistencia a la rotura y resistencia a la fatiga, en comparación con el estado recocido. La principal desventaja es que este metal no es apropiado para uso prolongado a causa de su limitada resistencia a la corrosión dentro del cuerpo humano. En consecuencia, las aplicaciones más eficaces las encuentra en tornillos para huesos, placas (figura 9.74), clavos intramedulares para huesos y otros dispositivos de fijación temporal. En la figura 9.75 se muestra un ejemplo de una fractura en la cual una placa para huesos y numerosos tornillos fueron utilizados con propósitos de estabilización. Estos componentes pueden quitarse después que ocurra un grado suficiente de rehabilitación.

9.11.2 Aleaciones a base de cobalto

En los implantes ortopédicos se utilizan principalmente cuatro tipos de aleaciones a base de cobalto: (1) aleación fundida Co-28 Cr-6 Mo (ASTM F 75), (2) aleación forjada Co-20 Cr-15 W-10 Ni (ASTM F 90), (3) aleación fundida Co-28 Cr-6 Mo tratada térmicamente (ASTM F 799) y (4) aleación forjada Co-35 Ni-20 Cr-10 No (ASTM F 562). Como en el caso de los aceros inoxidables, el alto porcentaje de Cr contenido en estas aleaciones promueve la resistencia a la corrosión mediante la formación de una capa pasivada. Se debe señalar que la resistencia a la corrosión de estas aleaciones, a largo plazo, es muy superior a la del acero inoxidable, lo cual las hace notablemente más biocompatibles. La aleación F75 es una aleación fundida que produce un tamaño de grano grueso y también tiende a crear una microestructura nucleada (una

Figura 9.74
Placas ortopédicas para huesos largos.
(© Science Photo Library/Photo Researchers, Inc.)

Figura 9.75
Reducción de una fractura de peroné mediante una placa de compresión y tornillos aplicados al hueso.
(© Science Photo Library/Photo Researchers, Inc.)

estructura no equilibrada que se analiza en el capítulo 5). Estas dos características son indeseables en las aplicaciones ortopédicas porque dan por resultado un componente débil. La aleación F799 tiene una composición similar a la de la aleación F75, pero se forja para darle su forma final en una serie de pasos. Las primeras etapas del forjado se realizan en caliente para permitir un flujo significativo, y las etapas finales se realizan en frío para dar lugar al endurecimiento. Esto mejora las características de resistencia de la aleación, en comparación con la F75. La aleación F90 contiene un nivel significativo de Ni y W para mejorar sus características de maquinado y fabricación. En el estado recocido, sus propiedades corresponden a las de la F75, pero con 44% de trabajo en frío, su elasticidad, resistencia a la rotura y resistencia a la fatiga casi duplican a las de la F75. Sin embargo, hay que tener cuidado para lograr que las propiedades sean uniformes en todo el componente porque de lo contrario estará propenso a fallas inesperadas. Finalmente, la aleación F562 posee por amplio margen la combinación más eficaz de dureza, ductilidad y resistencia a la corrosión. Esta aleación está trabajada en frío y endurecida por envejecimiento hasta un límite elástico superior a 1795 MPa, manteniendo a la vez una ductilidad de casi 8 por ciento. Debido a su combinación de resistencia a la corrosión a largo plazo y dureza, estas aleaciones se usan a menudo en dispositivos de fijación permanente y en componentes de articulaciones de reemplazo (figura 9.76).

Figura 9.76
Prótesis de cobalto y cromo para reemplazar una rodilla. Observe que el componente femoral descansa sobre el componente tibial.
(Cortesía de Zimmer, Inc.)

9.11.3 Aleaciones de titanio

Las aleaciones de titanio, incluso las alfa, beta y alfa-beta comercialmente puras, fueron descritas brevemente en la sección 9.92. Cada aleación tiene características mecánicas y de moldeo que son atractivas para diferentes aplicaciones. Lo cierto es que estas aleaciones tienen una notable resistencia a la corrosión, aun en algunos ambientes agresivos como el del cuerpo humano. La resistencia de estas aleaciones a la corrosión es superior, tanto a la del acero inoxidable como a la de las aleaciones cobalto-cromo. Su resistencia a la corrosión proviene de su capacidad para formar una capa protectora de óxido TiO_2 a menos de 535°C (véase el capítulo 13). Desde el punto de vista ortopédico, la excelente biocompatibilidad del titanio, su alta resistencia a la corrosión y su bajo módulo de elasticidad son sumamente deseables. El titanio comercialmente puro (CP-F67) es un metal de solidez relativamente baja y se usa en las aplicaciones ortopédicas que no requieren alta resistencia, como tornillos y grapas para cirugía espinal. Las aleaciones alfa que contienen Al (estabilizador alfa), Sn, y/o Zr no pueden endurecerse apreciablemente por tratamiento calórico y, por lo tanto, no ofrecen ventajas significativas sobre las aleaciones CP en las aplicaciones ortopédicas. Las aleaciones alfa-beta contienen tanto estabilizadores alfa (A1) como beta (V o Mo). En consecuencia, una mezcla de las fases alfa y beta coexiste a temperatura ambiente. El tratamiento por solución puede aumentar la resistencia de esas aleaciones entre 30 y 50 por ciento, en comparación con el estado recocido. Algunos ejemplos de aleaciones alfa-beta utilizadas en aplicaciones ortopédicas son Ti-6 Al-4 V (F1472), Ti-6 Al-7 Nb y Ti-5 Al-2.5 Fe. La aleación F1472 es la más común en aplicaciones ortopédicas,

Tabla 9.18 Propiedades de una selección de aleaciones de metal que se usan en aplicaciones ortopédicas

Material	Designación ASTM	Estado	Módulo elástico (GPa)	Límite elástico (MPa)	Resistencia a la ruptura (MPa)	Límite de fatiga (MPa)
Aceros inoxidables	F55, F56, F138, F139	Recocido	190	331	586	241-276
		30% trabajado en frío	190	792	930	310-448
		Forjado en frío	190	1 213	1 351	820
Aleaciones de cobalto	F75	Fundido tosco, recocido	210	448-517	655-889	207-310
		Hip	253	841	1 277	725-950
	F799	Forjado en caliente	210	896-1 200	1 399-1 586	600-896
	F90	Recocido	210	448-648		951-1 220
		44% trabajado en frío	210	1 606	1 896	586
	F562	Forjado en caliente	232	965-1 000	1 206	500
		Forjado en frío, envejecido	232	1 500	1 795	689-793
Aleación de titanio	F67	30% trabajado en frío	110	485	760	300
	F136	Forjado, recocido	116	896	965	620
		Forjado, tratado térmico	116	1 034	1 103	620-689

Fuente: "Orthopedic Basic Science", American Academy of Orthopedic Science, 1999.

como el reemplazo de articulaciones completas. Las otras dos aleaciones se usan en vástagos femorales de cadera, placas, tornillos, varillas y clavos. Las aleaciones beta (que contienen principalmente estabilizadores beta) son excelentes para la forja porque no se endurecen por deformación. Sin embargo, pueden ser tratadas por solución y envejecidas hasta alcanzar niveles de resistencia más elevados que los de las aleaciones alfa-beta. De hecho, entre todas las aleaciones de titanio, utilizadas para fabricar implantes ortopédicos, las aleaciones beta son las que tienen el módulo de elasticidad más bajo (una ventaja médica; véase la siguiente sección). Las propiedades mecánicas de las aleaciones para aplicaciones ortopédicas que gozan de más aceptación se presentan en la tabla 9.18 con fines de comparación. Las principales desventajas de las aleaciones de titanio en aplicaciones ortopédicas es su mala resistencia al desgaste y su alta sensibilidad a las grietas (la presencia de un rasguño o una grieta reduce su vida útil en términos de fatiga). Debido a su mala resistencia al desgaste, no se deben usar en superficies de articulaciones, como las de cadera y rodilla, a menos que reciban un tratamiento superficial mediante procesos de implantación iónica.

9.12 ALGUNOS PUNTOS A CONSIDERAR SOBRE LA APLICACIÓN ORTOPÉDICA DE LOS METALES

Entre las propiedades críticas de los implantes ortopédicos figuran un alto límite elástico (para resistir la deformación plástica bajo carga), la resistencia a la fatiga (para resistir cargas cíclicas), la dureza (para resistir el desgaste cuando la articulación está dañada) y, curiosamente, un bajo módulo de elasticidad (para lograr la proporcionalidad en el soporte de la carga entre el hueso y el metal). Para entender esto con claridad, considere que antes de una fractura todas las fuerzas actuantes (de músculos, tendones y huesos) están en equilibrio. Después de la fractura, ese equilibrio se pierde y se necesita una operación para unir al componente fracturado (junto con todos sus frag-

mentos) a implantes ortopédicos y estabilizar la fractura. Si la fractura se reconstruye perfectamente, el hueso seguirá siendo capaz de soportar una porción significativa de la carga y el implante actuará principalmente como la estructura en torno a la cual el hueso fracturado se reconstruye (soporta poca carga). Sin embargo, en muchas situaciones, a causa de la complejidad de la fractura (por ejemplo, pueden faltar algunos fragmentos) o por una fijación o estabilización inadecuada, el implante no sólo soporta una cantidad desproporcionada de carga, sino también puede estar sometida a torceduras y curvaturas (permanentes en algunas situaciones). Todo esto puede dar lugar a una falla del implante por fatiga. Por estas razones, el límite elástico y las resistencias a la tensión y la fatiga de los biometales son factores críticos y deben ser lo más favorables que sea posible.

Sin embargo, el módulo de elasticidad de un biometal es una situación diferente. En muchas situaciones de fijación de las fracturas, el alto módulo de elasticidad (una medida de la resistencia a la deformación elástica) del implante de metal es motivo de preocupación. Para entender esto, observe que el módulo de elasticidad del hueso (en la dirección que soporta la carga) es de casi 17 GPa (2.5×10^6 psi). En comparación, los módulos de elasticidad del titanio, el acero inoxidable y las aleaciones a base de cobalto son 110 (80 para aleaciones beta), 190 y 240 Gpa, respectivamente. Considere una situación en la que el eje tibial (la tibia es uno de los huesos largos que están abajo de la articulación de la rodilla) se ha roto en una fractura simple transversal como se muestra en la figura 9.77 (véase la flecha). Para fijar y estabilizar la fractura, se usa un dispositivo metálico en forma de clavo con tornillos de acoplamiento. Dichos tornillos no siempre son necesarios, pero ayudan a la estabilización y previenen el

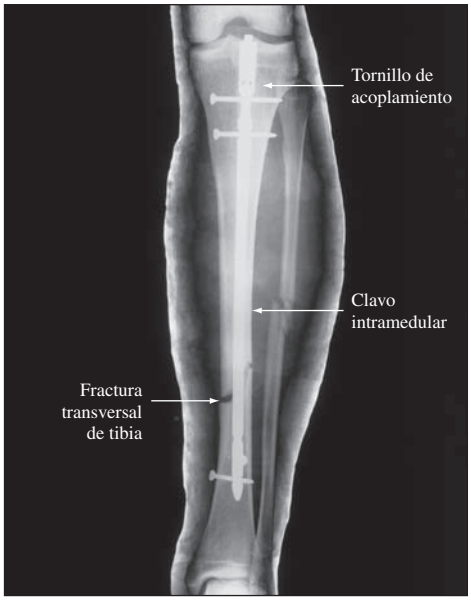


Figura 9.77
Aplicación de un clavo intramedular y un tornillo de acoplamiento para estabilizar una fractura de tibia.
(© Science Photo Library/Photo Researchers, Inc.)

acortamiento del hueso o la rotación de los fragmentos fracturados. Debido a que el metal tiene un módulo de elasticidad considerablemente más alto que el hueso, el implante de metal soporta una parte desproporcionada de la carga. En otras palabras, el implante metálico protegerá al hueso para que no esté sometido a la carga que tendría que soportar en condiciones normales; este fenómeno se conoce como *protección de esfuerzos*. Aunque desde un punto de vista de la ingeniería esto parece deseable y lógico, desde el punto de vista biológico es indeseable. El material óseo responde a la tensión remodelándose (reconstruyéndose) según el nivel de esfuerzo aplicado. Debido a la protección de esfuerzos, el hueso se remodela a un nivel de carga más bajo y su calidad se deteriora. Por esta razón, las aleaciones de titanio que tienen el módulo de elasticidad más bajo de las tres aleaciones principales son las más deseables para esas aplicaciones. Este ejemplo explica con claridad los desafíos que implica la selección de materiales para las aplicaciones ortopédicas.

Otro problema importante en la aplicación ortopédica de los metales, sobre todo en las situaciones que afectan a las articulaciones como las de la rodilla y la cadera, es el desgaste de las superficies articuladas. Cuando una cadera enferma o dañada es sustituida por una prótesis metálica, las superficies en contacto sufren desgaste y desgarres a causa del gran número de ciclos de carga que deben soportar. El desgaste de la superficie da lugar a la formación de partículas metálicas de desgaste, de unos cuantos micrones, que se alojan en el tejido circundante y causan el aflojamiento de la prótesis y exponen al cuerpo a la toxicidad del metal. Aunque el desgaste es una eventualidad y se presenta con cualquier metal o material que se utilice, las aleaciones de titanio son especialmente propensas al desgaste y pueden ocasionar graves complicaciones. Para esas aplicaciones son más adecuadas las aleaciones de cobalto-cromo.

9.13 RESUMEN

Las aleaciones de ingeniería se pueden subdividir convenientemente en dos tipos: ferrosas y no ferrosas. Las aleaciones ferrosas tienen al hierro como su principal componente, mientras que las aleaciones no ferrosas tienen otros metales diferentes del hierro como componentes principales. Los aceros, que son aleaciones ferrosas, son por amplio margen, las aleaciones metálicas más importantes, sobre todo por su costo relativamente bajo y su amplia gama de propiedades mecánicas. Las propiedades mecánicas de los aceros al carbono pueden modificarse considerablemente mediante el trabajo en frío y el recocido. Cuando el contenido del carbono y los aceros aumenta a más de 0.3 por ciento aproximadamente, es posible tratarlos térmicamente por templado y revenido para dotarlos de alta resistencia con un grado razonable de ductilidad. Los elementos aleados, como níquel, cromo y molibdeno, se agregan a los aceros al carbono simples para producir aceros de baja aleación. Los aceros de baja aleación tienen buenas combinaciones de alta resistencia y tenacidad y se usan extensivamente en la industria automotriz para aplicaciones como engranajes, flechas y ejes.

Las aleaciones de aluminio son las más importantes de las aleaciones no ferrosas, sobre todo por su ligereza, la facilidad con que pueden trabajarse, su resistencia a la corrosión y su costo relativamente bajo. El cobre puro se usa extensivamente por su alta conductividad eléctrica, su resistencia a la corrosión, la facilidad con que es trabajado y su costo relativamente bajo. El cobre forma con el zinc aleaciones de latón que tienen mayor resistencia que el cobre puro.

Los aceros inoxidables son aleaciones ferrosas importantes debido a su alta resistencia a la corrosión en ambientes oxidantes. Para que un acero sea “inoxidable” debe contener 12 por ciento de Cr por lo menos.

Los hierros fundidos son otra familia de aleaciones ferrosas industrialmente importantes. Su costo es bajo y tienen propiedades especiales, como su gran facilidad para ser fundidos, su resistencia al desgaste y su durabilidad. El hierro fundido gris es altamente maquinable y tiene capacidad para amortiguar las vibraciones a causa de las escamas de grafito que hay en su estructura.

Otras aleaciones no ferrosas brevemente analizadas en este capítulo son las aleaciones de magnesio, titanio y níquel. Las aleaciones de magnesio son excepcionalmente ligeras, tienen aplicaciones en la industria aeroespacial y se usan también en el equipo de manejo de materiales. Las aleaciones de titanio son caras pero tienen una combinación de resistencia y ligereza que no se encuentra en ningún otro sistema de aleación metálica; se usan ampliamente en las partes estructurales de las aeronaves. Las aleaciones de níquel tienen alta resistencia a la corrosión y la oxidación, por lo cual se utilizan comúnmente en las industrias petroleras y de procesamiento químico. Cuando el níquel se alea con cromo y cobalto, forma el sustento de las superaleaciones a base de níquel que se necesitan en turbinas de gas para aviones jet y en ciertos equipos generadores de energía eléctrica.

En este capítulo hemos analizado de manera limitada la estructura, las propiedades y las aplicaciones de algunas aleaciones importantes en la ingeniería. Hemos presentado también aleaciones para propósitos especiales cuya importancia y aplicación van en aumento en diversas industrias. El uso de las aleaciones intermetálicas, los metales amorfos y las superaleaciones en el campo biomédico tiene especial importancia. Estos materiales tienen propiedades superiores a las de las aleaciones convencionales.

9.14 DEFINICIONES

Sec. 9.2

Austenita (fase γ en un diagrama de fases de Fe-Fe_3C): solución sólida intersticial de carbono en hierro ccc; la máxima solubilidad sólida del carbono en austenita es 2.0 por ciento.

Austenitización: calentamiento de un acero dentro del rango de la temperatura de la austenita, de modo que su estructura se vuelva austenita. La temperatura de austenitizado varía según la composición del acero.

Ferrita α (fase α en el diagrama de fases Fe-Fe_3C): solución sólida intersticial de carbono en hierro con estructura cúbica (BCC); la máxima solubilidad sólida del carbono en hierro (cc) es 0.02 por ciento.

Cementita: compuesto intermetálico Fe_3C; sustancia dura y quebradiza.

Perlita: mezcla de fases de ferrita α y cementita (Fe_3C) en placas paralelas (estructura laminar) producida por la descomposición eutectoide de la austenita.

Ferrita α eutectoide: ferrita α que se forma durante la descomposición eutectoide de la austenita; la α ferrita contenida en la perlita.

Cementita eutectoide (Fe_3C): la cementita que se forma durante la descomposición eutectoide de la austenita; la cementita contenida en la perlita.

Eutectoide (acero al carbono simple): acero con 0.8% C.

Hipoeutectoide (acero al carbono simple): acero con menos de 0.8% C.

Hipereutectoide (acero al carbono simple): acero entre 0.8 y 2.0% C.

Ferrita α proeutectoide: ferrita α que se forma por la descomposición de la austenita a temperaturas por arriba de la temperatura eutectoide.

Cementita proeutectoide (Fe_3C): cementita que se forma por la descomposición de la austenita a temperaturas por arriba de la temperatura eutectoide.

Sec. 9.3

Martensita: solución sólida intersticial sobresaturada de carbono en hierro tetragonal de cuerpo centrado.

Bainita: mezcla de ferrita α y partículas muy pequeñas de Fe_3C producidas por la descomposición de la austenita; producto eutectoide no lamelar producido por la descomposición de la austenita.

Esferoidita: mezcla de partículas de cementita (Fe_3C) en una matriz de ferrita α.

Diagrama de transformación isotérmica (TI): diagrama de tiempo-temperatura-transformación que indica el tiempo que tarda una fase en descomponerse isotérmicamente en otras fases, a diferentes temperaturas.

Diagrama de transformación bajo enfriamiento continuo (TEC): diagrama de tiempo-temperatura-transformación que indica el tiempo que tarda una fase en descomponerse en otras fases en forma continua, a diferentes velocidades de enfriamiento.

Martemperizado (martemplado): proceso de templado instantáneo por el cual un acero en estado austenítico es templado térmicamente en un baño líquido (salino) a una temperatura superior a M_s, se la mantiene así por un intervalo de tiempo bastante corto para evitar que la austenita se transforme, y luego se deja enfriar lentamente a temperatura ambiente. Después de este tratamiento, el acero se encontrará en estado martensítico, pero la interrupción del templado permite que los esfuerzos del acero se relajen.

Austemperizado: proceso de templado instantáneo por el cual un acero en estado austenítico se templa en un baño líquido caliente (salino) a una temperatura apenas superior a la M_s del acero, se mantiene en ese baño hasta que la austenita del acero se transforma por completo, y luego se enfría a temperatura ambiente. Con este proceso puede producirse un acero eutectoide al carbono simple en estado totalmente bainítico.

M_s: temperatura a la cual la austenita de un acero empieza a transformarse en martensita.

M_f: temperatura a la cual la austenita de un acero finaliza su transformación en martensita.

Revenido (de un acero): proceso de recalentar un acero templado para incrementar su tenacidad y ductilidad. En este proceso, la martensita se transforma en martensita revenida.

Acero al carbono simple: aleación de hierro-carbono con 0.02 a 2% C. Todos los aceros al carbono simples de tipo comercial contienen entre 0.3 y 0.9 por ciento de manganeso, además de impurezas de azufre, fósforo y silicio.

Sec. 9.4

Templabilidad: facilidad con la cual se forma martensita en un acero al templarlo a partir del estado austenítico. Un acero altamente templable es el que forma secciones gruesas constituidas por martensita en su totalidad. La templabilidad no debe confundirse con la dureza. La dureza es la resistencia de un material a la penetración. La templabilidad de un acero se da principalmente en función de su composición y del tamaño de su grano.

Prueba de templabilidad de Jominy: prueba en la cual una barra de 1 pulg (2.54 cm) de diámetro y 4 pulg (10.2 cm) de largo es austenitizada y luego templada en agua en uno de sus extremos. La dureza se mide en el lado de la barra que se encuentra hasta 2.5 pulg (6.35 cm) del extremo templado. Una gráfica llamada *curva de templabilidad de Jominy* se construye representando la dureza de la barra contra la distancia del extremo templado.

Sec. 9.8

Hierros fundidos blancos: aleaciones de hierro-carbono-silicio que tienen de 1.8 a 3.6% C y de 0.5 a 1.9% Si. Los hierros fundidos blancos contienen grandes cantidades de carburo de hierro que los hace duros y quebradizos.

Hierros fundidos grises: aleaciones de hierro-carbono-silicio que tienen de 2.5 a 4.0% C y de 1.0 a 3.0% Si. Los hierros fundidos grises contienen grandes cantidades de carbono en forma de escamas de grafito. Son fáciles de maquinar y tienen buena resistencia al desgaste.

Hierros fundidos dúctiles: aleaciones de hierro-carbono-silicio que tienen de 3.0 a 4.0% C y de 1.8 a 2.8% Si. Los hierros fundidos dúctiles contienen grandes cantidades de carbono en forma de nódulos de grafito (esferas), en lugar de escamas como en el caso de hierro fundido gris. La adición de magnesio (0.05 por ciento aproximadamente) antes que el hierro fundido líquido sea vertido permite la formación de nódulos. En general, los hierros dúctiles tienen mayor ductilidad que los hierros fundidos grises.

Hierros fundidos maleables: aleaciones de hierro-carbono-silicio que tienen de 2.0 a 2.6% C y de 1.1 a 1.6% Si. Los hierros fundidos maleables se funden primero como hierros fundidos blancos; luego son sometidos a tratamiento térmico a casi 940°C (1 720°F) y así se mantienen entre 3 y 20 h. El carburo de hierro contenido en el hierro blanco se descompone en nódulos o grafito irregulares.

Sec. 9.10

Intermetálicos: compuestos estequiométricos de elementos metálicos de alta dureza y alta resistencia a la temperatura, pero frágiles.

Aleaciones con memoria de forma: aleaciones metálicas que recuperan una forma previamente definida cuando son sometidos a un proceso apropiado de tratamiento térmico.

Metal amorfo: metales de estructura no cristalina llamados también metal vítreo. Estas aleaciones tienen alto umbral de deformación elástica.

9.15 PROBLEMAS

Las respuestas a los problemas marcados con un asterisco se encuentran al final del libro.

9.1 ¿Cómo se extrae el arrabio en bruto a partir de minerales de óxido de hierro?

9.2 Escriba una reacción química típica para la reducción del óxido de hierro (Fe_2O_3) por monóxido de carbono para producir hierro.

9.3 Describa el proceso básico de oxígeno para convertir el arrabio en acero.

9.4 ¿Por qué el diagrama de fases de Fe-Fe_3C es un diagrama de fases metaestable, en lugar de un verdadero diagrama de fases en equilibrio?

9.5 Defina las siguientes fases contenidas en el diagrama de fases del Fe-Fe_3C: *a*) austenita, *b*) ferrita α, *c*) cementita y *d*) ferrita δ.

9.6 Escriba las reacciones correspondientes a las tres reacciones invariables que ocurren en el diagrama de fases de Fe-Fe_3C.

9.7 ¿Cuál es la estructura de la perlita?

9.8 Indique la diferencia entre los tres tipos siguientes de aceros al carbono simples: *a*) eutectoide, *b*) hipoeutectoide y *c*) hipereutectoide.

9.9 Describa los cambios estructurales que tienen lugar cuando un acero al carbono simple eutectoide es enfriado lentamente a partir de la región austenítica, apenas por arriba de la temperatura eutectoide.

9.10 Describa los cambios estructurales que ocurren cuando un acero al carbono simple con 0.4% C es enfriado lentamente desde la región austenítica, apenas por arriba de la temperatura superior de transformación.

9.11 Explique la diferencia entre la ferrita proeutectoide y la ferrita eutectoide.

***9.12** Un acero al carbono simple hipoeutectoide con 0.65% C es enfriado lentamente a partir de casi 950°C hasta una temperatura apenas por *arriba* de 723°C. Calcule los porcentajes en peso de la austenita y de la ferrita proeutectoide contenidas en este acero.

9.13 Un acero al carbono simple hipoeutectoide con 0.25% C es enfriado lentamente a partir de 950°C hasta una temperatura apenas por *debajo* de 723°C.

a) Calcule el porcentaje en peso de la ferrita proeutectoide contenida en el acero.

b) Calcule el porcentaje en peso de la ferrita eutectoide y de la cementita eutectoide contenidas en este acero.

***9.14** Un acero al carbono simple contiene 93% en peso de ferrita y 7% en peso de Fe_3C. ¿Cuál es su contenido promedio de carbono, en porcentaje en peso?

9.15 Acero al carbono simple que contiene 45% en peso de ferrita proeutectoide. ¿Cuál es el contenido promedio de carbono, en porcentaje en peso?

9.16 Un acero al carbono simple contiene 5.9% en peso de ferrita hipoeutectoide. ¿Cuál es el contenido de carbono promedio?

***9.17** Un acero al carbono simple hipereutectoide con 0.90% C se enfría lentamente a partir de 900°C hasta una temperatura apenas por *arriba* de 723°C. Calcule el porcentaje en peso de la cementita proeutectoide y la austenita presentes en el acero.

9.18 Un acero al carbono simple hipereutectoide con 1.10% C es enfriado lentamente a partir de 900°C hasta una temperatura apenas por *abajo* de 723°C.

a) Calcule el porcentaje en peso de la cementita proeutectoide presente en el acero.

b) Calcule el porcentaje en peso de la cementita eutectoide y el porcentaje en peso de la ferrita eutectoide presentes en el acero.

***9.19** Si un acero al carbono simple hipereutectoide contiene 4.7% en peso de cementita proeutectoide, ¿cuál es su contenido promedio de carbono?

***9.20** Un acero al carbono simple hipereutectoide contiene 10.7% en peso de Fe_3C eutectoide. ¿Cuál es su contenido promedio de carbono, en porcentaje en peso?

9.21 Un acero al carbono simple contiene 20.0% en peso de ferrita proeutectoide. ¿Cuál es su contenido promedio de carbono?

9.22 Un acero al carbono simple hipoeutectoide con 0.55% C es enfriado lentamente a partir de 950°C hasta una temperatura apenas por debajo de 723°C.

a) Calcule el porcentaje en peso de la ferrita proeutectoide contenida en el acero.

b) Calcule el porcentaje en peso de la ferrita eutectoide y de la cementita eutectoide contenidas en el acero.

9.23 Un acero hipoeutectoide contiene 44.0% en peso de ferrita eutectoide. ¿Cuál es su contenido promedio de carbono?

***9.24** Un acero hipoeutectoide contiene 24.0% en peso de ferrita eutectoide. ¿Cuál es su contenido promedio de carbono?

9.25 Un acero al carbono simple hipereutectoide con 1.10% C es enfriado lentamente a partir de 900°C hasta una temperatura apenas por debajo de 723°C.

a) Calcule el porcentaje en peso de la cementita proeutectoide presente en el acero.

b) Calcule el porcentaje en peso de la cementita eutectoide y de la ferrita eutectoide presentes en el acero.

9.26 Defina qué es una martensita Fe-C.

9.27 Describa a los siguientes tipos de martensitas Fe-C que se presentan en los aceros al carbono simples: *a*) martensita de listón y *b*) martensita de placa.

9.28 Describa algunas características de la transformación de la martensita Fe-C que tiene lugar en aceros al carbono simples.

9.29 ¿Cuál es la causa de que se cree la tetragonalidad en la red de hierro BCC cuando el contenido de carbono de las martensitas Fe-C es mayor de 0.2 por ciento aproximadamente?

9.30 ¿Por qué causa se desarrolla una alta dureza y resistencia en las martensitas Fe-C de aceros al carbono simples cuando su contenido de carbono es alto?

9.31 ¿Qué es una transformación isotérmica en estado sólido?

9.32 Dibuje un diagrama de transformación isotérmica para un acero eutectoide al carbono simple e indique los diversos productos de descomposición del mismo. ¿Cómo se puede trazar un diagrama semejante a partir de una serie de experimentos?

9.33 Si una muestra delgada de un acero al carbono simple eutectoide es templada en caliente a partir de la región austenítica y mantenida a 700°C hasta que la transformación sea completa, ¿cuál será su microestructura?

9.34 Si una muestra delgada de un acero al carbono simple eutectoide es templada en agua desde la región austenítica hasta la temperatura ambiente, ¿cuál será su microestructura?

9.35 ¿Cómo está constituida la microestructura de la bainita? ¿Cuál es la diferencia microestructural entre la bainita superior y la inferior?

9.36 Dibuje las trayectorias de enfriamiento tiempo-temperatura para un acero 1080 en un diagrama de transformación isotérmica, de modo que se produzcan las siguientes microestructuras. Comience con los aceros en estado austenítico en el tiempo = 0 y a 850°C. *a*) 100 por ciento de martensita, *b*) 50 por ciento de martensita y 50 por ciento de perlita gruesa, *c*) 100 por ciento de perlita fina, *d*) 50 por ciento de martensita y 50 por ciento de bainita superior, *e*) 100 por ciento de bainita superior y *f*) 100 por ciento de bainita inferior.

9.37 ¿Cuál es la diferencia entre el diagrama de transformación isotérmica de un acero al carbono simple hipoeutectoide y el de uno eutectoide?

9.38 Dibuje un diagrama de transformación bajo enfriamiento continuo para un acero al carbono simple eutectoide. ¿Cuál es su diferencia con respecto a un diagrama de transformación isotérmica eutectoide para un acero al carbono simple?

9.39 Dibuje trayectorias de enfriamiento tiempo-temperatura para un acero 1080 en un diagrama de transformación bajo enfriamiento continuo que produzca las siguientes microestructuras. Comience con el acero en estado austenítico en el tiempo = 0 y a 850°C. *a*) 100 por ciento de martensita, *b*) 50 por ciento de perlita fina y 50 por ciento de martensita, *c*) 100 por ciento de perlita gruesa y *d*) 100 por ciento de perlita fina.

9.40 Describa el tratamiento térmico para el recocido completo de un acero al carbono simple. ¿Qué tipos de microestructura se producen con el recalentamiento completo de *a*) un acero eutectoide y *b*) de un acero hipoeutectoide?

9.41 Describa el tratamiento térmico de proceso de recocido en el caso de un acero al carbono simple hipoeutectoide con menos de 0.3% C.

9.42 ¿Cuál es el tratamiento térmico de normalización para el acero? ¿Cuáles son algunos de sus propósitos?

9.43 Describa el proceso de revenido para un acero al carbono simple.

9.44 ¿Qué tipos de microestructura se producen al revenir un acero al carbono simple con más de 0.2 por ciento de carbono, en los rangos de temperatura *a*) 20-250°C, *b*) 250-350°C y *c*) 400-600°C?

9.45 ¿Cuál es la causa de la disminución de la dureza durante el revenido de un acero al carbono simple?

9.46 Describa el proceso de martemperizado (martemplado) para un acero al carbono simple. Dibuje una curva de enfriamiento para un acero al carbono simple eutectoide austenitizado, sometido a temple martensítico, mediante un diagrama TI. ¿Qué tipo de microestructura se produce después de someter este acero a martemperizado?

9.47 ¿Cuáles son las ventajas del martemperizado? ¿Qué tipo de microestructura se produce después de revenir un acero martemperizado?

9.48 ¿Por qué es incorrecto el término *martemperizado*? Sugiera un término mejor.

9.49 Describa el proceso de austemperizado para un acero al carbono simple. Trace una curva de enfriamiento para un acero al carbono simple eutectoide austemperizado y austenitizado; use un diagrama TI.

9.50 ¿Cuál es la microestructura producida después del austemperizado de un acero al carbono simple eutectoide? ¿Un acero austemperizado necesita ser revenido? Explique.

9.51 ¿Cuáles son las ventajas del proceso de austemperizado? ¿Y las desventajas?

9.52 Trozos delgados de tiras de acero 1080 laminado en caliente, de 0.3 mm de grosor, son tratados térmicamente en las siguientes formas. Use el diagrama TI de la figura 9.23 y otros conocimientos que posea para determinar la microestructura de las muestras de acero después de cada tratamiento térmico.

a) Calentamiento durante 1 h a 860°C; templado en agua.

b) Calentamiento durante 1 h a 860°C; templado en agua; recalentamiento por 1 h a 350°C. ¿Cuál es el nombre de este tratamiento térmico?

c) Calentamiento durante 1 h a 860°C; templado en un baño de sal fundida a 700°C, donde se mantiene 2 h; templado en agua.

d) Calentamiento durante 1 h a 860°C; templado en un baño de sal fundida a 260°C, donde se mantiene 1 min; enfriamiento por aire. ¿Cuál es el nombre de este tratamiento térmico?

e) Calentamiento durante 1 h a 860°C; temple en un baño de sal fundida a 350°C; se mantiene allí 1 h; enfriado por aire. ¿Cuál es el nombre de este tratamiento térmico?

f) Calentamiento durante 1 h a 860°C; temple en agua; recalentamiento durante 1 h a 700°C.

9.53 Explique el sistema de numeración utilizado por AISI y SAE para los aceros al carbono simples.

9.54 ¿Cuáles son algunas limitaciones de los aceros al carbono simples para los diseños de ingeniería?

9.55 ¿Cuáles son los principales elementos de aleación que se agregan a los aceros al carbono simples para producir aceros de baja aleación?

9.56 ¿Cuál es el sistema AISI-SAE para designar aceros de baja aleación?

9.57 ¿Qué elementos se disuelven principalmente en la ferrita de los aceros al carbono?

9.58 Haga una lista por orden creciente sobre la tendencia de los siguientes elementos a formar carburos: titanio, cromo, molibdeno, vanadio y tungsteno.

9.59 ¿Qué compuestos forma el aluminio en los aceros?

9.60 Mencione dos elementos que estabilizan la austenita en los aceros.

9.61 Mencione cuatro elementos que estabilizan la ferrita en los aceros.

9.62 ¿Qué elementos elevan la temperatura eutectoide del diagrama de fases Fe-Fe_3C? ¿Qué elementos la hacen descender?

9.63 Defina la templabilidad de un acero. Defina la dureza de un acero.

9.64 Describa la prueba de templabilidad de Jominy.

9.65 Explique de qué manera se obtienen los datos para trazar la curva de templabilidad de Jominy y cómo se construye dicha curva.

9.66 ¿Cuál es la utilidad industrial de las curvas de templabilidad de Jominy?

9.67 Una barra de acero austenitizado de 55 mm de diámetro, fabricada de acero 9840, es templada en aceite agitado. Prediga cuál será la dureza RC a $\frac{3}{4}$ R del centro de la barra y al centro de la misma.

***9.68** Una barra de acero 4140 austenitizado, de 60 mm de diámetro, se templa en agua agitada. Prediga cuál será la dureza RC en su superficie y en su centro.

***9.69** Una barra de acero austenitizado 5140 de 50 mm de diámetro es templada en aceite agitado. Prediga cuál será la dureza Rockwell C de la barra *a*) en su superficie y *b*) en el punto medio entre su superficie y su centro (radio medio).

9.70 Una barra de acero 4340 austenitizado de 80 mm de diámetro es templada en agua agitada. Prediga cuál será la dureza Rockwell C de la barra *a*) en su superficie y *b*) en su centro.

9.71 Una barra de acero 5140 austenitizado de 50 mm de diámetro es templada en aceite agitado. Prediga cuál será la dureza Rockwell C de la barra *a*) a $\frac{3}{4}$ R y *b*) en su centro.

9.72 Una barra de acero 4140 austenitizado y templado tiene una dureza Rockwell C de 40 en un punto de su superficie. ¿Qué tasa de enfriamiento experimentó la barra en ese punto?

***9.73** Una barra de acero 8640 austenitizada y templada tiene una dureza Rockwell C de 35 en un punto de su superficie. ¿Qué velocidad de enfriamiento experimentó la barra en ese punto?

9.74 Una barra de acero 5140 austenitizada y templada tiene una dureza Rockwell C de 35 en un punto de su superficie. ¿Qué velocidad de enfriamiento experimentó la barra en ese punto?

9.75 Una barra de acero 4340 austenitizada de 40 mm de diámetro se templa en agua agitada. Grafique la dureza Rockwell C de la barra *versus* la distancia de una a otra superficie de la misma a través de su diámetro en los siguientes puntos: en la superficie, a $\frac{3}{4}$ R, $\frac{1}{2}$ R (medio radio) y en el centro. Ese tipo de gráfica se conoce como *perfil de dureza a través del diámetro de la barra.* Suponga que el perfil de dureza es simétrico con respecto al centro de la barra.

9.76 Una barra de acero 9840 austenitizado de 50 mm de diámetro se templa en aceite agitado. Repita el perfil de dureza del problema 9.75 para este acero.

9.77 Una barra de acero 8640 austenitizado de 60 mm de diámetro se templa en aceite agitado. Repita el perfil de dureza del problema 9.75 para este acero.

9.78 Una barra de acero 8640 austenitizado de 60 mm de diámetro se templa en agua agitada. Repita el perfil de dureza del problema 9.75 para este acero.

9.79 Una barra de acero estándar 4340 austenitizado es enfriada a razón de 5°C/s (a 51 mm del extremo templado de una barra de Jominy). ¿Cuáles serán los componentes de la microestructura de la barra a 200°C? Véase la figura 9.39.

***9.80** Una barra de acero estándar 4340 austenitizado se enfría a razón de 8°C/s (a 19.0 mm del extremo templado de una barra de Jominy). ¿Cuáles serán los componentes de la microestructura de la barra a 200°C? Véase la figura 9.39.

9.81 Una barra de acero estándar 4340 austenitizado se enfría a razón de 50°C/s (a 9.5 mm del extremo templado de una barra de Jominy). ¿Cuáles serán los componentes de la microestructura de la barra a 200°C? Véase la figura 9.39.

9.82 Explique cómo una aleación templable por precipitación se endurece por tratamiento térmico.

9.83 ¿Qué tipo de diagrama de fases se necesita para que una aleación binaria se pueda templar por precipitación?

9.84 ¿Cuáles son los tres pasos básicos del tratamiento térmico para reforzar una aleación templable por precipitación?

9.85 ¿En qué rango de temperatura debe calentarse una aleación binaria templable por precipitación para completar el paso del tratamiento térmico en solución?

9.86 ¿Por qué una aleación templable por precipitación es relativamente débil inmediatamente después del tratamiento térmico en solución y el templado?

9.87 Explique la diferencia entre el envejecimiento natural y el envejecimiento artificial para una aleación templable por precipitación.

9.88 ¿Cuál es la fuerza que causa la descomposición de una solución sólida sobresaturada de una aleación templable por precipitación?

9.89 ¿Cuál es el primer producto de descomposición de una aleación templable por precipitación en el estado de solución sólida sobresaturada, después de ser envejecida a baja temperatura?

9.90 ¿Qué son las zonas GP?

9.91 ¿Por qué el precipitado de equilibrio no se forma directamente a partir de la solución sólida sobresaturada de una aleación templable por precipitación si la temperatura de envejecimiento es baja? ¿Cómo se puede formar el precipitado de equilibrio a partir de la solución sólida sobresaturada?

9.92 ¿Qué es una curva de envejecimiento para una aleación templable por precipitación?

9.93 ¿Qué tipos de precipitados se desarrollan en una aleación considerablemente poco envejecida a bajas temperaturas? ¿Qué tipos se desarrollan cuando está excesivamente envejecida?

9.94 ¿Cuál es la diferencia entre un precipitado coherente y uno incoherente?

9.95 Describa las cuatro estructuras de descomposición que pueden desarrollarse cuando una solución sólida sobresaturada de una aleación Al-4% Cu es envejecida.

***9.96** Calcule el % en peso de θ en una aleación Al-5.0% Cu que es enfriada lentamente desde 548 hasta 27°C. Suponga que la solubilidad sólida del Cu en Al a 27°C es 0.02% en peso y que la fase θ contiene 54.0% en peso de Cu.

Ice Nine

9.97 Una aleación binaria Al-8.5% en peso de Cu se enfría lentamente a partir de 700°C hasta apenas por debajo de 548°C (la temperatura eutéctica).

a) Calcule el % en peso de α proeutéctica que está presente apenas por arriba de 548°C.

b) Calcule el % en peso de α eutéctica que está presente apenas por abajo de 548°C.

c) Calcule el % en peso de la fase θ que está presente apenas por debajo de 548°C.

9.98 ¿Cuáles son algunas de las propiedades por las cuales el aluminio es un material de ingeniería extremadamente útil?

9.99 ¿Cómo se extrae el óxido de aluminio del mineral de bauxita? ¿Cómo se extrae aluminio del óxido de aluminio puro?

9.100 ¿Cómo se clasifican las aleaciones forjadas de aluminio?

9.101 ¿Cuáles son las designaciones básicas de revenido para aleaciones de aluminio?

9.102 ¿Qué series de aleaciones forjadas de aluminio no son tratables térmicamente? ¿Cuáles son tratables térmicamente?

9.103 ¿Cuáles son los precipitados básicos de endurecimiento para las aleaciones de aluminio forjado tratables térmicamente?

9.104 Describa los tres principales procesos de fundición que se utilizan con las aleaciones de aluminio.

9.105 ¿Cómo se clasifican las aleaciones fundidas de aluminio? ¿Cuál es el elemento aleado más importante para las aleaciones fundidas de aluminio? ¿Por qué?

9.106 ¿Cuáles son algunas propiedades importantes del cobre no aleado que lo hacen importante como metal industrial?

9.107 ¿Cómo se extrae el cobre de los concentrados de minerales de sulfuro de cobre?

9.108 ¿Cómo se clasifican las aleaciones de cobre según el sistema de la Copper Development Association?

9.109 ¿Por qué no se puede usar cobre electrolítico tenaz para aplicaciones en las que es calentado a más de 400°C en una atmósfera que contiene hidrógeno?

Laboratorio virtual

9.110 ¿Cómo puede evitarse que el cobre ETP se vuelva frágil? (Proponga dos métodos.)

9.111 Describa las microestructuras de los siguientes latones Cu-Zn a 75×:
a) 70% Cu-30% Zn (latón para cartuchería) en estado recocido y
b) 60% Cu-40% Zn (metal de Muntz) en estado laminado en caliente.

9.112 ¿Por qué se agregan pequeñas cantidades de plomo a algunos latones Cu-Zn? ¿En qué estado se distribuye el plomo en los latones?

9.113 ¿Cuáles son las aleaciones de cobre comercial de más alta resistencia? ¿Qué tipo de tratamiento térmico y qué método de fabricación hacen que esas aleaciones sean tan fuertes?

9.114 ¿Qué elemento de aleación y qué cantidad del mismo (porcentaje en peso) son necesarias para hacer que un acero sea "inoxidable"?

9.115 ¿Qué tipo de película superficial protege los aceros inoxidables?

9.116 ¿Cuáles son los cuatro tipos básicos de aceros inoxidables?

9.117 ¿Qué es el bucle gamma en el diagrama de fases del Fe-Cr? ¿Es el cromo un elemento estabilizador de la austenita o de la ferrita en el caso del hierro? Explique la razón de su respuesta.

9.118 ¿Cuál es la composición básica de los aceros inoxidables ferríticos?

9.119 ¿Por qué se considera que los aceros inoxidables ferríticos no son tratables térmicamente?

9.120 ¿Cuál es la composición básica de los aceros inoxidables martensíticos? ¿Por qué son térmicamente tratables esos aceros?

9.121 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de los aceros inoxidables ferríticos y martensíticos?

9.122 ¿Por qué es posible que un acero inoxidable austenítico tenga una estructura austenítica a temperatura ambiente?

9.123 ¿Por qué los aceros inoxidables austeníticos que se enfrían lentamente en el rango de 870 a 600°C se vuelven susceptibles a la corrosión intergranular?

9.124 ¿Cómo puede prevenirse la susceptibilidad intergranular de los aceros inoxidables austeníticos enfriados lentamente?

9.125 ¿Qué son los hierros fundidos? ¿Cuál es el rango básico de su composición?

9.126 ¿Cuáles son algunas propiedades de los hierros fundidos que los hacen importantes como materiales de ingeniería? ¿Cuáles son algunas de sus aplicaciones?

9.127 ¿Cuáles son los cuatro tipos básicos de hierros fundidos?

9.128 Describa la microestructura del fundido tosco de un hierro fundido blanco sin aleación a 100×.

9.129 ¿Por qué la superficie fracturada del hierro fundido blanco tiene este color?

9.130 Describa la microestructura de un hierro fundido gris clase 30 en estado de fundido tosco a 100×. ¿Por qué la superficie fracturada de un hierro fundido gris tiene este color?

9.131 ¿Cuáles son los rangos de la composición del carbono y el silicio en el hierro fundido gris? ¿Por qué tienen los hierros fundidos grises cantidades relativamente altas de silicio?

9.132 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de los hierros fundidos grises?

9.133 ¿Qué condiciones de fundido favorecen la formación del hierro fundido gris?

9.134 ¿Cómo se puede producir una matriz totalmente ferrítica en un hierro gris en estado de fundido tosco, después que ha sido fundido?

9.135 ¿Cuáles son los rangos de composición del carbono y el silicio en los hierros fundidos dúctiles?

9.136 Describa la microestructura de un hierro fundido dúctil 80-55-06 de grado fundido tosco a 100×. ¿Cuál es la causa de la estructura tipo ojo de buey?

9.137 ¿Por qué los hierros fundidos dúctiles en general son más dúctiles que los hierros fundidos grises?

9.138 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de los hierros fundidos dúctiles?

9.139 ¿Por qué en los hierros fundidos dúctiles el grafito forma nódulos esféricos en vez de escamas de grafito como en los hierros fundidos grises?

9.140 ¿Cuáles son los rangos de composición del carbono y el silicio en los hierros fundidos maleables?

9.141 Describa la microestructura de un hierro fundido maleable ferrítico (grado M3210) a 100×.

9.142 ¿Cómo se producen los hierros fundidos maleables?

9.143 ¿Cuáles son algunas ventajas de las propiedades de los hierros fundidos maleables?

9.144 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de los hierros fundidos maleables?

9.145 ¿Qué ventajas tienen las aleaciones de magnesio como materiales de ingeniería?

9.146 ¿Cómo se designan las aleaciones de magnesio?

9.147 Explique qué indican las siguientes designaciones de aleaciones de magnesio: *a*) ZE63A-T6, *b*) ZK51A-T5 y *c*) AZ31B-H24.

9.148 ¿Qué elementos de aleación se agregan al magnesio para su endurecimiento por solución sólida?

9.149 ¿Por qué es difícil trabajar en frío las aleaciones de magnesio?

9.150 ¿Qué elementos de aleación se agregan al magnesio para mejorar su resistencia a altas temperaturas?

9.151 ¿Por qué el titanio y sus aleaciones son especialmente importantes en ingeniería para aplicaciones aeroespaciales?

9.152 ¿Por qué es tan caro el metal titanio?

9.153 ¿Qué cambio ocurre en la estructura cristalina del titanio a 883°C?

9.154 ¿Cuáles son dos elementos de estabilización de fase alfa para el titanio?

9.155 ¿Cuáles son dos elementos estabilizadores de fase beta para el titanio?

9.156 ¿Cuál es la aleación más importante del titanio?

9.157 ¿Cuáles son algunas aplicaciones del titanio y sus aleaciones?

9.158 ¿Por qué es el níquel un metal importante en la ingeniería? ¿Cuáles son sus ventajas? ¿Y sus desventajas?

9.159 ¿Qué son las aleaciones Monel? ¿Cuáles son algunas de sus aplicaciones?

9.160 ¿Qué tipo de precipitados se usan para reforzar la aleación templable por precipitación Monel K500?

9.161 ¿En qué sentido son "súper" las superaleaciones a base de níquel?

9.162 ¿Cuál es la composición básica de la mayoría de las superaleaciones a base de níquel?

9.163 ¿Cuáles son las tres principales fases presentes en las superaleaciones a base de níquel?

9.16 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. Se considera la posibilidad de usar una aleación de acero y un acero al carbono simple para la fabricación de bielas forjadas. Estos metales pueden tratarse térmicamente a 260 ksi (aleación de acero) y 113 ksi (acero al carbono), respectivamente. Si el diámetro de la biela debe ser de 0.5 pulg, ¿qué metal elegiría usted para esa aplicación y por qué?

2. Los aceros al carbono simples y las aleaciones de acero se usan ampliamente en la fabricación de pernos y tornillos. Exponga el mayor número posible de razones para explicar esta situación.

3. Para evitar las picaduras en las superficies de acoplamiento de engranajes de uso pesado, ¿cuál de estos metales seleccionaría usted para fabricar dichos engranes: acero 4140 (48 HRC) o hierro fundido (28 HRC) y por qué?

4. *a*) Al seleccionar los materiales para balatas de frenos o discos para embragues, ¿qué características hay que considerar? *b*) Sugiera qué materiales satisfarían sus requisitos.

5. *a*) Proponga ejemplos de componentes o productos que originalmente se fabricaban con aleaciones de acero y hoy se hacen con aleaciones de aluminio. *b*) En cada caso, exponga razones por las cuales ocurrió este cambio.

6. *a*) Proponga dos ejemplos de aleaciones de aluminio que no pueden ser endurecidas por tratamiento térmico. *b*) ¿Cómo incrementaría usted la dureza en esos casos?

7. Las aleaciones de magnesio son "pirofóricas". *a*) ¿Qué significa este término? *b*) ¿Cómo afecta eso la selección del proceso de manufactura?

8. *a*) Si usted tuviera que seleccionar el material para la fabricación de las tuberías de un condensador convencional o de un intercambiador de calor, tomando como base tanto el rendimiento como el costo, ¿cuál de las siguientes aleaciones metálicas seleccionaría: aleaciones de acero al carbono simples, superaleaciones de níquel o aleaciones de cobre, y por qué? *b*) Proponga un ejemplo específico de la aleación que usted seleccionaría.

9. *a*) ¿Qué tipo de aleación es el Inconel (describa su composición)? *b*) ¿Cuáles son sus propiedades importantes? *c*) Mencione algunas de sus aplicaciones.

10. Tomando como base la información de la figura 9.19, *a*) seleccione una aleación de acero al carbono simple que sea capaz de alcanzar un valor de dureza de 60 HRC después del templado, *b*) explique cómo se logra este cambio de dureza y *c*) proponga un proceso para reducir de nuevo la dureza a 20 HRC.

11. Diseñe un proceso de tratamiento basado en el diagrama de transformación isotérmica del acero al carbono eutectoide que daría lugar a un metal con *a*) dureza Rockwell mayor de 66 HRC, *b*) dureza Rockwell de 44 HRC aproximadamente y *c*) dureza Rockwell de 5 HRC.

12. *a*) Diseñe una aleación de acero al carbono simple que contenga 90% en peso de ferrita y 10% en peso de cementita a temperatura ambiente. *b*) ¿Es esta aleación hipereutectoide o hipoeutectoide?

13. *a*) Seleccione una aleación de acero al carbono simple que contenga 80% en peso de austenita y 20% en peso de Fe_3C a 900°C. *b*) ¿Es esta aleación hipereutectoide o hipoeutectoide?

14. Diseñe un proceso de tratamiento térmico para el acero eutectoide que dé por resultado una microestructura final de 50 por ciento de martensita y 50 por ciento de perlita fina.

15. Diseñe un proceso de tratamiento térmico para el acero eutectoide cuyo resultado sea una estructura formada íntegramente por bainita con una dureza de HRC 47.

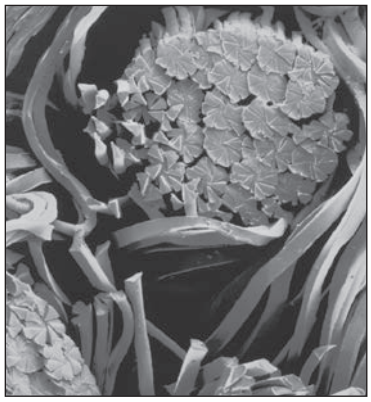
16. Es frecuente que aparezcan grietas en las esquinas agudas de los componentes de acero después del templado. Para evitar esto se desalienta la inclusión de las esquinas agudas. ¿Qué sugeriría usted si en un caso se requirieran las esquinas agudas y tuviera que utilizarse un proceso de tratamiento térmico?

17. Un maquinista fabrica un perno y una tuerca de acero 1080 recocido. A continuación, trata térmicamente los componentes por austenitización, templado y revenido para lograr mayor dureza. *a*) Después del proceso de tratamiento térmico, las roscas ya no ajustan. Explique por qué. *b*) ¿Cómo evitaría usted este problema?

CAPÍTULO 10

Materiales poliméricos

(© Eye of Science/Photo Researchers, Inc.)



(© Science Photo Library/Photo Researchers, Inc.)

(© Tim Tadder/NewSport/ Corbis)

Las microfibras son fibras artificiales mucho más pequeñas que un cabello humano (más delgadas que las fibras de seda) y se encuentran divididas en varias partes, dispuestas en forma de v, como se indica en la figura 1. Las fibras convencionales son, de modo significativo, más gruesas y tienen un corte transversal circular sólido. Las microfibras se pueden producir a partir de diversos polímeros, entre ellos el poliéster, nailon y acrílico. Las telas hechas de microfibras poseen una superficie mucho mayor debido a las fibras más pequeñas y a las hendiduras en forma de v que pueden atrapar líquido e impurezas. El agua y las impurezas en realidad son atrapadas por las hendiduras en forma de v de la fibra, a diferencia de lo que pasa en las fibras circulares sólidas convencionales, que simplemente las rechazan. Por tanto, las telas de microfibra son más suaves y sedosas al tacto (lo que es importante para la industria de la confección), y absorben agua e impurezas en cantidades mucho más grandes (lo cual es importante para la industria de la limpieza). Estas características son la causa de que la tela de microfibras sea muy usada en la confección de ropa deportiva y en la industria de la limpieza. Los dos principales materiales a base de microfibra son el poliéster (material para estregar) y la poliamida (material absorbente). ■

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Definir y clasificar los polímeros, incluso los termofijos, termoplásticos y elastómeros.
2. Describir las diversas reacciones y etapas de la polimerización.
3. Describir términos tales como funcionalidad, vinilo, vinilideno, homopolímero y copolímero.
4. Describir diversos métodos de polimerización industrial.
5. Describir la estructura de los polímeros y compararla con la de los metales.
6. Describir la temperatura de transición vítrea y los cambios que sufren la estructura y las propiedades de los materiales poliméricos a temperaturas próximas a dicha temperatura.
7. Describir diversos procesos de elaboración utilizados para fabricar componentes termofijos y termoplásticos.
8. Nombrar un número razonable de termoplásticos, termofijos, elastómeros, y sus aplicaciones.
9. Explicar los mecanismos de deformación, refuerzo, relajamiento de esfuerzos y fractura en los polímeros.
10. Describir los biopolímeros y su uso en aplicaciones biomédicas.

10.1 INTRODUCCIÓN

La palabra *polímero* significa, literalmente, "muchas partes". En este sentido, puede considerarse como un material polimérico sólido aquel que contiene múltiples partes o unidades enlazadas químicamente y que están unidas entre sí para formar un sólido. En este capítulo se estudian algunos aspectos de la estructura, propiedades, procesado y aplicaciones de dos materiales poliméricos importantes en los procesos de fabricación industrial: *plásticos* y *elastómeros.* Los *plásticos*[1] son un grupo grande y variado de materiales sintéticos, que se procesan para darles forma por moldeo o deformación. Así como existen muchos tipos de metales, como el aluminio y el cobre, también se cuenta con muchos tipos de plásticos, como el polietileno y el nailon. Los *plásticos* se dividen en dos clases, **termoplásticos** y **termofijos**, según sean los enlaces químicos de su estructura. Los *elastómeros* o cauchos pueden alcanzar una deformación elástica muy grande cuando se les aplica una fuerza, y recuperar su forma original (o casi) cuando cesa la fuerza.

[1] La palabra *plástico* tiene muchos significados. Como sustantivo, plástico se refiere a una clase de materiales que pueden ser moldeados o que se les puede dar forma. Como adjetivo, plástico significa capaz de ser moldeado. Otro uso de plástico como adjetivo es para describir la deformación permanente continua de un metal sin ruptura, como en la "deformación plástica de los metales".

10.1.1 Termoplásticos

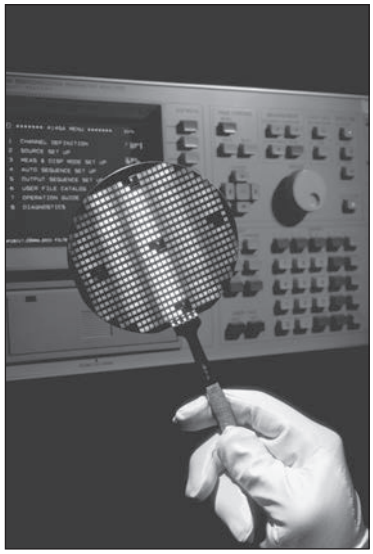
A los termoplásticos es necesario calentarlos para darles su forma y después enfriarlos, de este modo adquieren y conservan la forma que se les dio. Estos materiales pueden volverse a calentar cierto número de veces para darles nuevas formas sin que haya un cambio significativo en sus propiedades. La mayoría de los termoplásticos están constituidos por cadenas principales muy largas de átomos de carbono, enlazados entre sí en forma covalente. Algunas veces, se enlazan también átomos de nitrógeno, oxígeno o azufre en forma covalente con la cadena molecular principal. Los átomos o grupos de átomos adheridos están enlazados de forma covalente a los átomos de la cadena principal. En los termoplásticos, las largas cadenas moleculares están ligadas entre sí por enlaces secundarios.

10.1.2 Plásticos termofijos

Los plásticos termofijos que adquieren una forma permanente y curados o "fijados" por una reacción química, no se pueden volver a fundir y darles forma de nuevo, ya que se degradan o descomponen cuando se calientan a una temperatura muy alta. En otras palabras, los plásticos termofijos no son reciclables. El término *termofijo* indica que se requiere calor (la palabra griega que significa calor es *thermē*) para endurecer permanentemente al plástico. Sin embargo, hay muchos plásticos que son llamados termofijos que sólo se pueden fijar o curar a temperatura ambiente mediante una reacción química. La mayoría de los plásticos termofijos están compuestos por una red de átomos de carbono enlazados en forma covalente para formar un sólido rígido. Algunas veces, también se enlazan en forma covalente átomos de nitrógeno, oxígeno, azufre u otros para formar una estructura reticular termofija.

Los plásticos son materiales de ingeniería importantes por múltiples razones. Tienen una amplia variedad de propiedades, de las cuales algunas son imposibles de obtener con cualquier otro material, y en la mayoría de los casos su costo es relativamente bajo. El uso de los plásticos en diseños de ingeniería mecánica ofrece múltiples ventajas, entre las que se incluyen: ahorro de partes debido al diseño de ingeniería con plásticos, menos operaciones de acabado, simplificación del ensamble, menor peso, reducción de ruido y, en ciertos casos, la no necesidad de lubricar algunas partes. Los plásticos también son muy útiles para diversos diseños de ingeniería eléctrica, principalmente por sus excelentes propiedades aislantes. Las aplicaciones eléctricas y electrónicas de los materiales plásticos incluyen conectores, interruptores, relés, unidades de sintonización de TV, formas para bobinas, tableros de circuitos integrados y componentes de computadora. En la figura 10.1 se muestran algunos ejemplos del uso de materiales plásticos en diseños de ingeniería.

La cantidad de materiales plásticos que se usan en la industria ha aumentado en forma notable. Un buen ejemplo del aumento del uso industrial de los plásticos se observa en la fabricación de automóviles. Los ingenieros que diseñaron el Cadillac 1959 se asombraban de haber puesto 25 libras de plásticos en ese vehículo. En 1980 el promedio era de 200 libras de plástico en cada auto. El uso de los plásticos en el automóvil de 1990 fue de casi 300 libras por vehículo. Es verdad que no todas las industrias han incrementado el uso de plásticos como la industria automotriz, pero en las décadas recientes ha habido un aumento generalizado en el uso de los plásticos en la industria. A continuación veamos los detalles de la estructura, las propiedades y las aplicaciones de los plásticos y elastómeros.



a) *b*) *c*)

Figura 10.1
Algunas aplicaciones de los plásticos usados en ingeniería. *a*) carcasa del control remoto de TV que usa resina sintética estirénica especial para cumplir los requisitos de brillo, dureza y resistencia a rajaduras. *(Foto: Dow Chemical USA.)*
b) Obleas semiconductoras hechas del termoplástico Vitrex PEEK (polieteretercetona). *c*) Termoplástico de nailon reforzado con 30 por ciento de fibra de vidrio para reemplazar al aluminio en la entrada de aire del colector múltiple del motor turbodiesel del Ford Transit. (DSM Engineering Plastics, Países Bajos.)
[a) © Royalty-Free/CORBIS. b) © Charles O'Rear/CORBIS. c) © Tom Pantages.]

10.2 REACCIONES DE POLIMERIZACIÓN

La mayoría de los termoplásticos se sintetizan por medio del proceso de *polimerización de crecimiento en cadena.* En este proceso muchas moléculas pequeñas (pueden ser miles) se enlazan entre sí, en forma covalente, para formar cadenas moleculares muy largas. Las moléculas simples que se enlazan en forma covalente para formar cadenas largas se llaman **monómeros** (de las palabras griegas *mono*, que significa "uno", y *meros*, que significa "parte"). La molécula de cadena larga formada a partir de unidades de monómero se denomina **polímero** (de las palabras griegas *polys*, que significa "muchos", y *meros*, que significa "parte").

10.2.1 Estructura del enlace covalente de una molécula de etileno

La molécula de etileno, C_2H_4, está enlazada químicamente por un enlace covalente doble entre los átomos de carbono, y por cuatro enlaces covalentes sencillos entre el carbono y los átomos de hidrógeno (figura 10.2). Una molécula a base de carbono, que posee uno o más enlaces dobles carbono-carbono, recibe el nombre de *molécula insa-*

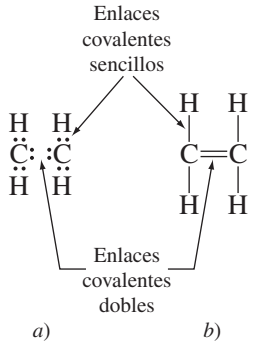


Figura 10.2
Enlace covalente en la molécula de etileno ilustrado por *a*) electrón-punto (los puntos representan los electrones de valencia), y *b*) notación de línea recta. En la molécula de etileno sólo hay un enlace doble covalente carbono-carbono y cuatro enlaces covalentes sencillos carbono-hidrógeno. El enlace doble es químicamente más reactivo que los enlaces sencillos.

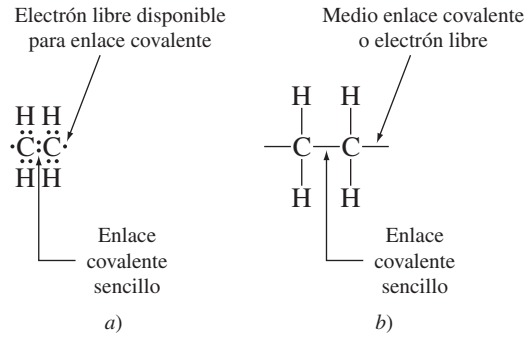


Figura 10.3
Estructura de los enlaces covalentes de una molécula activada de etileno. *a*) Notación electrón-punto (donde los puntos representan electrones de valencia). Los electrones libres se forman en cada extremo de la molécula y pueden enlazarse en forma covalente con los electrones libres de otras moléculas. Obsérvese que el enlace covalente doble que se forma entre los átomos de carbono ha sido reducido a un enlace sencillo. *b*) Notación de línea recta. Los electrones libres que quedan en los extremos de la molécula se indican por medios enlaces que están unidos solamente a un átomo de carbono.

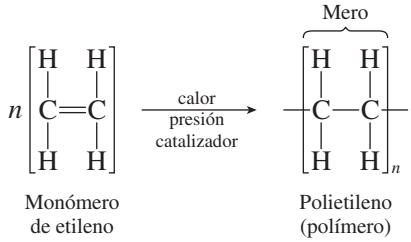
turada. El etileno es una molécula insaturada a base de carbono puesto que contiene un doble enlace carbono-carbono.

10.2.2 Estructura del enlace covalente de una molécula de etileno activada

Cuando la molécula de etileno se activa de modo que el doble enlace que se encuentra entre los dos átomos de carbono se "abre", el enlace covalente doble es reemplazado por un enlace covalente sencillo, como se muestra en la figura 10.3. Como resultado de la activación, cada átomo de carbono de la molécula inicial del etileno tiene un electrón libre para formar un enlace covalente con otro electrón libre que provenga de otra molécula. A continuación se verá cómo se puede activar la molécula de etileno y, como resultado de ello, cuántas unidades del monómero de etileno se pueden enlazar en forma covalente para formar un polímero. Éste es el proceso de **polimerización en cadena**. El polímero producido por la polimerización del etileno se llama *polietileno.*

10.2.3 Reacción general para la polimerización del polietileno y grado de polimerización

La reacción general para la polimerización en cadena del monómero de etileno para formar polietileno se puede escribir así



La subunidad que se repite en la cadena del polímero se denomina **mero**. El mero del polietileno es $+CH_2—CH_2+$ y se indica en la ecuación precedente. La *n* de la ecuación se conoce como el **grado de polimerización** (GP) de la cadena del polímero y es igual al número de subunidades o meros que hay en la cadena molecular del polímero. El GP promedio para rangos de polietileno que van de 3 500 a 25 000, corresponde a masas moleculares promedio que varían de 100 000 a 700 000 g/mol, aproximadamente.

PROBLEMA DE EJEMPLO 10.1

Si un tipo particular de polietileno tiene una masa molecular de 150 000 g/mol, ¿cuál es su grado de polimerización?

■ Solución

La unidad que se repite o mero del polietileno es $+CH_2—CH_2+$. Este mero tiene una masa de 4 átomos × 1 g = 4 g para los átomos de hidrógeno, más una masa de 2 átomos × 12 g = 24 g para los átomos de carbono, lo que hace un total de 28 g para cada mero de polietileno.

$$\text{GP} = \frac{\text{masa molecular del polímero (g/mol)}}{\text{masa de un mero (g/mero)}} \qquad \textbf{(10.1)}$$

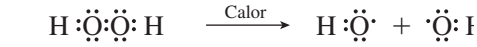
$$= \frac{150\,000 \text{ g/mol}}{28 \text{ g/mero}} = 5\,357 \text{ meros/mol} \blacktriangleleft$$

10.2.4 Pasos de la polimerización en cadena

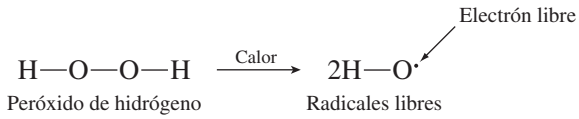
Las reacciones para la polimerización en cadena de los monómeros, como el etileno, para formar polímeros lineales, como el polietileno, se pueden dividir en los siguientes pasos: 1) iniciación, 2) propagación y 3) terminación.

Iniciación Para la polimerización en cadena del etileno se puede usar alguno de los múltiples tipos de catalizadores. En esta exposición se examina el uso de los peróxidos orgánicos que actúan como formadores de radicales libres. Un *radical libre* se define como un átomo, el cual con frecuencia es parte de un grupo más grande, tiene un electrón no apareado (electrón libre) el cual se puede enlazar en forma covalente con un electrón no apareado (electrón libre) de otro átomo o molécula.

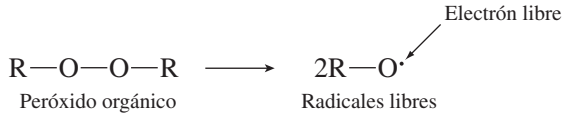
Primero se estudiará cómo una molécula de peróxido de hidrógeno, H_2O_2, puede descomponerse en dos radicales libres, como se muestra en las siguientes ecuaciones. Usando la notación electrón-punto para los enlaces covalentes,



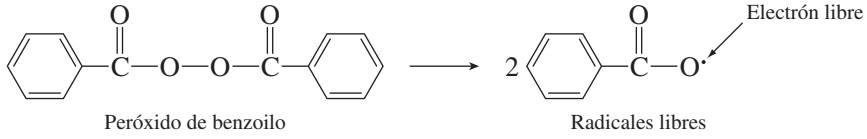
Usando la notación de línea recta para los enlaces covalentes,



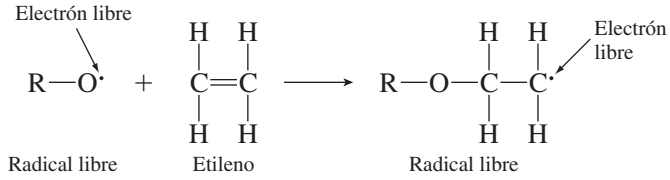
En la polimerización en cadena del radical libre del etileno, un peróxido orgánico puede descomponerse de la misma manera que el peróxido de hidrógeno. Si R—O—O—R representa un peróxido orgánico, donde R es un grupo químico, entonces, aplicando calor, este peróxido puede descomponerse en dos radicales libres de una forma similar a como lo hace el peróxido de hidrógeno, como sigue:



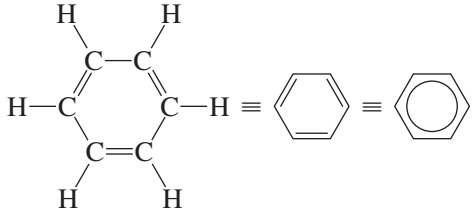
El peróxido de benzoilo es un peróxido orgánico que se usa para iniciar algunas reacciones de polimerización en cadena. Se descompone en radicales libres en la siguiente forma:[2]



Uno de los radicales libres formado por la descomposición del peróxido orgánico, puede reaccionar con una molécula de etileno para formar un nuevo radical libre de cadena más larga, como se muestra en la reacción



[2] El anillo hexagonal representa la estructura del benceno, como se indica a continuación. Véase también la sección 2.6.



El radical libre orgánico actúa en esta forma como un catalizador que inicia la polimerización del etileno.

Propagación El proceso de crecimiento de la cadena del polímero por la adición sucesiva de unidades de monómero se denomina *propagación*. El doble enlace que existe en el extremo de la unidad del monómero etileno puede ser "abierto" por el radical libre y enlazarse en forma covalente a la cadena. De esta manera, la cadena de polímero crece aún más mediante esta reacción

$$R{-}CH_2{-}\dot{C}H_2 + CH_2{=}CH_2 \longrightarrow R{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}\dot{C}H_2$$

Las cadenas de polímero en la polimerización en cadena siguen creciendo de forma espontánea porque la energía del sistema químico disminuye en virtud del proceso de polimerización en cadena. Es decir, la suma de las energías de los polímeros producidos es menor que la suma de las energías de los monómeros que produjeron los polímeros. Los grados de polimerización de los polímeros producidos por la polimerización de cadena varían dentro del material polimérico. Asimismo, el GP promedio varía entre los materiales poliméricos. En el caso del polietileno comercial, el GP tiene generalmente un promedio cuyo rango varía de 3 500 a 25 000.

Terminación La *terminación* puede ocurrir por la adición de un radical libre finalizador o cuando se combinan dos cadenas. Otra forma posible es que cantidades insignificantes de impurezas finalicen el crecimiento de la cadena del polímero. La finalización debida al acoplamiento de dos cadenas se puede representar con esta reacción

$$R(CH_2{-}CH_2)_m\dot{C}H_2 + R'(CH_2{-}CH_2)_n\dot{C}H_2 \longrightarrow R(CH_2{-}CH_2)_m{-}(CH_2{-}CH_2)_nR'$$

10.2.5 Peso molecular promedio de los termoplásticos

Los termoplásticos constan de cadenas de polímeros de diferentes longitudes, cada una de las cuales tiene su propio peso molecular y grado de polimerización. Así pues, se debe hablar de un peso molecular promedio al referirse a la masa molecular de un material termoplástico.

El peso molecular promedio de un termoplástico se puede determinar usando técnicas fisicoquímicas especiales. Un método que se usa comúnmente para este análisis consiste en determinar las fracciones de peso de los rangos de peso molecular. El peso molecular promedio del termoplástico es entonces la suma de las fracciones de peso, multiplicada por su peso molecular medio para cada rango particular y dividida entre la suma de las fracciones de peso. De esta manera,

$$\overline{M}_m = \frac{\sum f_i M_i}{\sum f_i} \qquad \textbf{(10.2)}$$

donde $\overline{M}_m$ = peso molecular promedio de un termoplástico
M_i = peso molecular medio de cada rango de peso molecular seleccionado
f_i = fracción de peso del material que tiene pesos moleculares de un rango de peso molecular seleccionado

PROBLEMA DE EJEMPLO 10.2

Calcule el peso molecular promedio $\overline{M}_m$ para un material termoplástico que tiene las fracciones de peso molecular medio f_i para los rangos de peso molecular que aparecen en la lista de la siguiente tabla:

Rango de peso molecular, g/mol	M_i	f_i	f_iM_i
5 000-10 000	7 500	0.11	825
10 000-15 000	12 500	0.17	2 125
15 000-20 000	17 500	0.26	4 550
20 000-25 000	22 500	0.22	4 950
25 000-30 000	27 500	0.14	3 850
30 000-35 000	32 500	0.10	3 250
		$\sum = 1.00$	$\sum = 19\,550$

■ **Solución**

Determine primero los valores medios para los rangos de peso molecular y luego haga una lista de estos valores, como se ha hecho en la columna encabezada por M_i que aparece en la tabla. Luego multiplique f_i por M_i para obtener los valores f_iM_i. El peso molecular promedio para este termoplástico es

$$\overline{M}_m = \frac{\sum f_iM_i}{\sum f_i} = \frac{19\,550}{1.00} = 19\,550 \text{ g/mol} \blacktriangleleft$$

10.2.6 Funcionalidad de un monómero

Para que un monómero se polimerice debe haber cuando menos dos enlaces químicos activos. Cuando el monómero tiene dos enlaces activos puede reaccionar con otros dos monómeros, y por repetición del enlace, otros monómeros del mismo tipo pueden formar una cadena larga o polímero lineal. Cuando un monómero tiene más de dos enlaces activos, la polimerización ocurre en más de dos direcciones y por tanto se pueden construir moléculas reticulares en tres dimensiones.

El número de enlaces activos que tiene un monómero se conoce como la **funcionalidad** del mismo. Un monómero que usa dos enlaces activos para la polimerización de cadenas largas se denomina *bifuncional.* Por tanto, el etileno es un ejemplo de un monómero bifuncional. Un monómero que usa tres enlaces activos para formar una red de material polimérico se llama *trifuncional.* El fenol, C_6H_5OH, es un ejemplo de un monómero trifuncional y se usa en la polimerización de fenol y formaldehído, de la cual se hablará posteriormente.

10.2.7 Estructura de los polímeros lineales no cristalinos

Si se examina al microscopio una cadena de polietileno de corta longitud, podrá observarse que adopta una configuración en zigzag (figura 10.4) debido al ángulo de enlace covalente entre los enlaces covalentes sencillos carbono-carbono, que es de aproximadamente 109°. Sin embargo, en una escala mayor, las cadenas de polímero están enredadas al azar en el polietileno no cristalino como espaguetis dentro de un tazón. Esta maraña de polímero lineal se ilustra en la figura 10.5. En el caso de algunos ma-

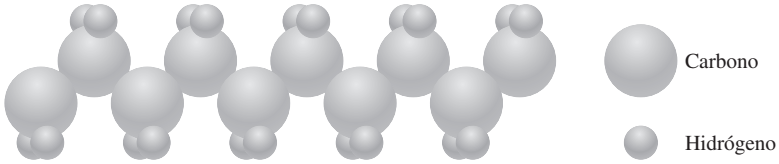


Figura 10.4
Estructura molecular de una cadena de polietileno de corta longitud. Los átomos de carbono tienen una distribución en zigzag debido a que todos los enlaces covalentes carbono-carbono tienen entre sí un ángulo de aproximadamente 109°.
(Según W. G. Moffatt, G. W. Pearsall y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. I: "Structure", Wiley, 1965, p. 65.)

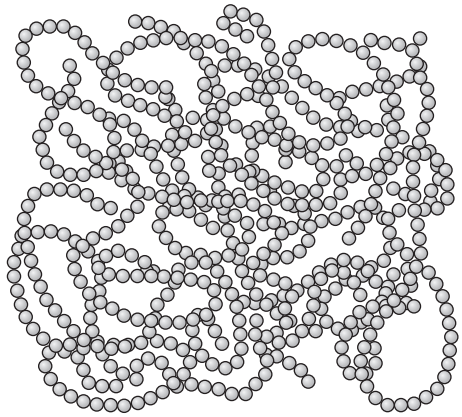


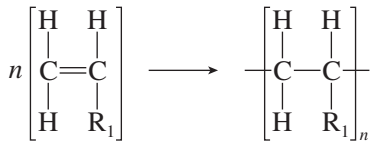
Figura 10.5
Representación esquemática de un polímero. Las esferas representan las unidades que se repiten en la cadena del polímero, y no a átomos específicos.
(Según W. G. Moffatt, G. W. Pearsall y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. I: "Structure", Wiley, 1965, p. 104.)

teriales poliméricos, como el polietileno, pueden presentarse tanto regiones cristalinas como no cristalinas. Este tema se tratará con más detalle en la sección 10.4.

El enlace entre las cadenas moleculares largas del polietileno se realiza por medio de enlaces débiles secundarios con dipolo permanente. Sin embargo, la maraña física de las largas cadenas moleculares también favorece la resistencia de este tipo de material polimérico. Además, se pueden formar ramas laterales, lo cual provoca un empaquetamiento flojo de las cadenas moleculares y favorece una estructura no cristalina. La ramificación de los polímeros lineales, por tanto, debilita los enlaces secundarios entre las cadenas y disminuye la resistencia a la tensión del material polimérico en masa.

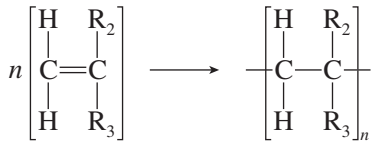
10.2.8 Polímeros de vinilo y vinilideno

Se pueden sintetizar muchos materiales poliméricos de adición (de cadena) útiles que tienen una estructura de cadena principal de carbono similar a la del polietileno, reemplazando a uno o más de los átomos de hidrógeno del etileno con otros tipos de átomos o grupos de átomos. Si sólo se reemplaza a un átomo de hidrógeno del monómero del etileno con otro átomo o grupo de átomos, el polímero polimerizado se llama *polímero de vinilo.* Algunos ejemplos de polímeros de vinilo son: policloruro de vinilo, polipropileno, poliestireno, acrilonitrilo y poliactetato de vinilo. La reacción general para la polimerización de los polímeros de vinilo es



donde R_1 puede ser otro tipo de átomo o grupo de átomos. En la figura 10.6 se muestra el enlace estructural de algunos polímeros de vinilo.

Si ambos átomos de hidrógeno de uno de los átomos de carbono del monómero de etileno se reemplazan con otros átomos o grupos de átomos, el polímero polimerizado se llama *polímero de vinilideno.* La reacción general de la polimerización de polímeros de vinilideno es



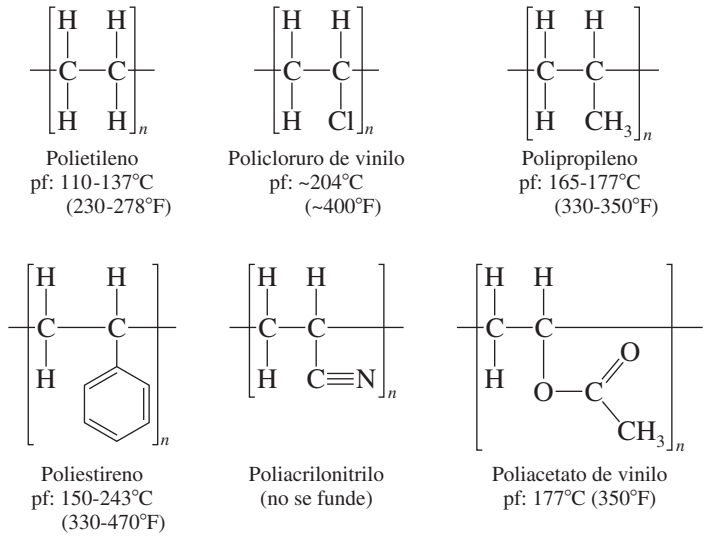
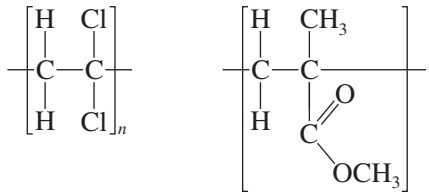


Figura 10.6
Fórmulas estructurales de algunos polímeros de vinilo.



Cloruro de polivinilideno
pf: 177°C (350°F)

Polimetilmetacrilato
pf: 160°C (320°F)

Figura 10.7
Fórmulas estructurales de algunos polímeros de vinilideno.

donde R_2 y R_3 pueden ser otros tipos de átomos o grupos atómicos. En la figura 10.7 se muestra el enlace estructural de dos polímeros de vinilideno.

10.2.9 Homopolímeros y copolímeros

Los **homopolímeros** son materiales poliméricos que consisten en cadenas de polímero formadas por unidades sencillas que se repiten. Esto significa que si A es una unidad que se repite, una cadena del homopolímero tendrá una secuencia de AAAAAAA · · · en la cadena molecular del polímero. Los **copolímeros**, en contraste, consisten en cadenas de polímero formadas por dos o más unidades químicamente diferentes que se repiten y que pueden estar en distintas secuencias.

Aunque en la mayoría de los copolímeros los monómeros están dispuestos al azar, se han identificado cuatro tipos distintos de copolímero: aleatorio, alternante, en bloque e injertado (figura 10.8).

Copolímeros aleatorios. Diferentes monómeros están dispuestos aleatoriamente dentro de las cadenas de polímero. Si A y B son monómeros diferentes, entonces una disposición puede ser (figura 10.8*a*)

AABABBBBAABABAAB · · ·

Copolímeros alternantes. Diferentes monómeros muestran un orden definido alterno como (figura 10.8*b*)

ABABABABABAB · · ·

Copolímeros de bloque. Diferentes monómeros en la cadena están dispuestos en bloques relativamente largos de cada monómero como en (figura 10.8*c*)

AAAAA—BBBBB— · · ·

Copolímeros injertados. Apéndices de un tipo de monómero se injertan en la cadena larga de otro, como en (figura 10.8*d*)

```
AAAAAAAAAAAAAAAAAAAA
     B         B
     B         B
     B         B
```

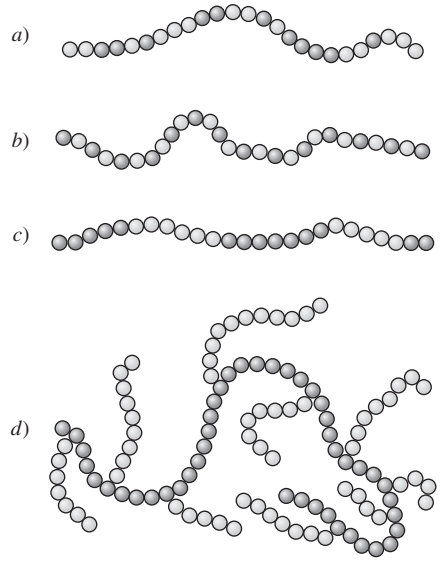


Figura 10.8
Arreglos de los copolímeros. *a*) Copolímero en el que las unidades diferentes están dispuestas aleatoriamente a lo largo de la cadena. *b*) Copolímero en el que las unidades se alternan regularmente. *c*) Copolímero de bloque. *d*) Copolímero injertado.
(Según W. G. Moffatt, G. W. Pearsall y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. I: "Structure", Wiley, 1965, p. 108.)

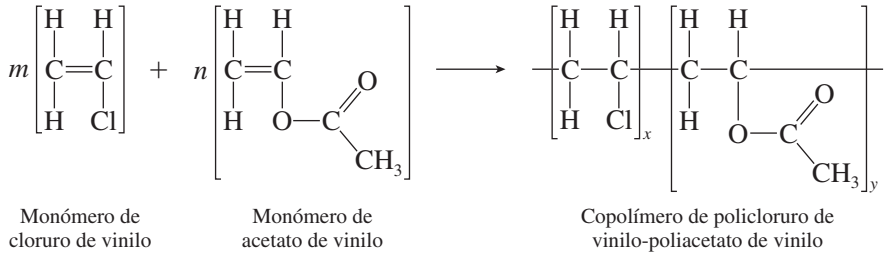


Figura 10.9
Reacción de polimerización generalizada de los monómeros de cloruro de vinilo y acetato de vinilo para producir un copolímero de policloruro de vinilo-poliacetato de vinilo.

La polimerización de reacción en cadena puede ocurrir entre dos o más monómeros diferentes si éstos se pueden introducir en las cadenas crecientes en las mismas proporciones y niveles de energía relativos. Un ejemplo de un copolímero industrialmente importante es el que se forma con policloruro de vinilo y poliacteato de vinilo y que se usa como material de recubrimiento para cables, estanques y latas. Una reacción de polimerización generalizada para la producción de este copolímero se ilustra en la figura 10.9.

PROBLEMA DE EJEMPLO 10.3

Un copolímero está formado por 15% en peso de poliacetato de vinilo (PVA, por sus siglas en inglés) y 85% en peso de policloruro de vinilo (PVC). Determine la fracción mol de cada componente.

■ Solución

Si se parte de una base de 100 g de copolímero, entonces se tienen 15 g de PVA y 85 g de PVC. Primero se determina el número de moles de cada componente que se tiene y luego se calculan las fracciones mol de cada uno.

Moles de poliacetato de vinilo. El peso molecular del mero de PVA se obtiene sumando las masas atómicas de los átomos, de acuerdo con la fórmula estructural para el mero de PVA (figura EP10.3*a*):

$$4 \text{ átomos de C} \times 12 \text{ g/mol} + 6 \text{ átomos de H} \times 1 \text{ g/mol} + 2 \text{ átomos de O} \times 16 \text{ g/mol} = 86 \text{ g/mol}$$

$$\text{Número de moles de PVA en 100 g de copolímero} = \frac{15 \text{ g}}{86 \text{ g/mol}} = 0.174$$

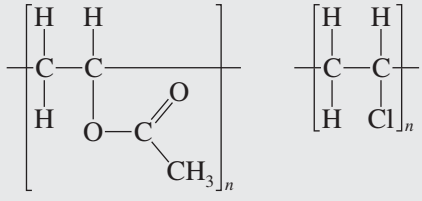
Moles de policloruro de vinilo. El peso molecular del mero de PVC se obtiene de la figura PE10.3*b*.

$$2 \text{ átomos de C} \times 12 \text{ g/mol} + 3 \text{ átomos de H} \times 1 \text{ g/mol} + 1 \text{ átomo de Cl} \times 35.5 \text{ g/mol} = 62.5 \text{ g/mol}$$

$$\text{Número de moles de PVA en 100 g de copolímero} = \frac{85 \text{ g}}{62.5 \text{ g/mol}} = 1.36$$

$$\text{Fracción mol de PVA} = \frac{0.174}{0.174 + 1.36} = 0.113$$

$$\text{Fracción mol de PVC} = \frac{1.36}{0.174 + 1.36} = 0.887$$



a) *b*)

Figura EP10.3
Fórmulas estructurales de los meros de *a*) poliacetato de vinilo y *b*) policloruro de vinilo.

PROBLEMA DE EJEMPLO 10.4

Determine las fracciones mol de cloruro de vinilo y de acetato de vinilo en un copolímero que tiene un peso molecular de 10 520 g/mol y un grado de polimerización de 160.

■ **Solución**

Del problema de ejemplo 10.3, el peso molecular del mero de PVC es 62.5 g/mol y el del mero de PVA es 86 g/mol.

Puesto que la suma de las fracciones mol de policloruro de vinilo, f_{vc}, y de poliacetato de vinilo, $f_{va} = 1, f_{va} = 1, -1 f_{vc}$. Por tanto, el peso molecular promedio del mero de copolímero es

$$\text{PM}_{\text{prom}}(\text{mero}) = f_{vc}\text{PM}_{vc} + f_{va}\text{PM}_{va} = f_{vc}\text{PM}_{vc} + (1 - f_{vc})\text{PM}_{va}$$

El peso molecular promedio del mero de copolímero es también

$$\text{PM}_{\text{prom}}(\text{mero}) = \frac{\text{PM}_{\text{prom}}(\text{polímero})}{\text{DP}} = \frac{10\,520 \text{ g/mol}}{160 \text{ meros}} = 65.75 \text{ g/(mol} \cdot \text{mero)}$$

El valor del f_{vc} se puede obtener igualando las dos ecuaciones de PM_{prom}(mero).

$$f_{vc}(62.5) + (1 - f_{vc})(86) = 65.75 \quad \text{o bien} \quad f_{vc} = 0.86$$
$$f_{va} = (1 - f_{vc}) = 1 - 0.86 = 0.14$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 10.5

Si un copolímero de cloruro de vinilo-acetato de vinilo tiene una relación de 10:1 de meros de cloruro de vinilo respecto a acetato de vinilo y su peso molecular es 16 000 g/mol, ¿cuál es su grado de polimerización?

■ **Solución**

$$\text{PM}_{\text{prom}}(\text{mero}) = \tfrac{10}{11}\text{PM}_{vc} + \tfrac{1}{11}\text{PM}_{va} = \tfrac{10}{11}(62.5) + \tfrac{1}{11}(86) = 64.6 \text{ g/(mol} \cdot \text{mero)}$$
$$\text{DP} = \frac{16.000 \text{ g/mol (polímero)}}{64.6 \text{ g/(mol} \cdot \text{mero)}} = 248 \text{ meros}$$

10.2.10 Otros métodos de polimerización

Polimerización sucesiva En la **polimerización sucesiva**, los monómeros reaccionan químicamente entre sí para producir polímeros lineales. En la polimerización sucesiva se supone que la reactividad de los grupos funcionales que están en los extremos de un monómero, en general, es aproximadamente igual cualquiera que sea el tamaño del polímero. Por tanto, las unidades de monómero pueden reaccionar entre sí o con polímeros producidos de cualquier tamaño. En muchas reacciones de polimerización sucesiva se produce una pequeña molécula como subproducto, por lo que a veces estos tipos de reacciones son llamadas *reacciones de polimerización por condensación*. Un ejemplo de una reacción de polimerización sucesiva es la reacción de la hexametilendiamina con ácido adípico para producir nailon 6,6 y agua como subproducto, como se muestra en la figura 10.10 para la reacción de una molécula de hexametilendiamina con otra de ácido adípico.

Polimerización reticular En algunas reacciones de polimerización que incluyen un reactivo químico con más de dos lugares reactivos, se puede producir un mate-

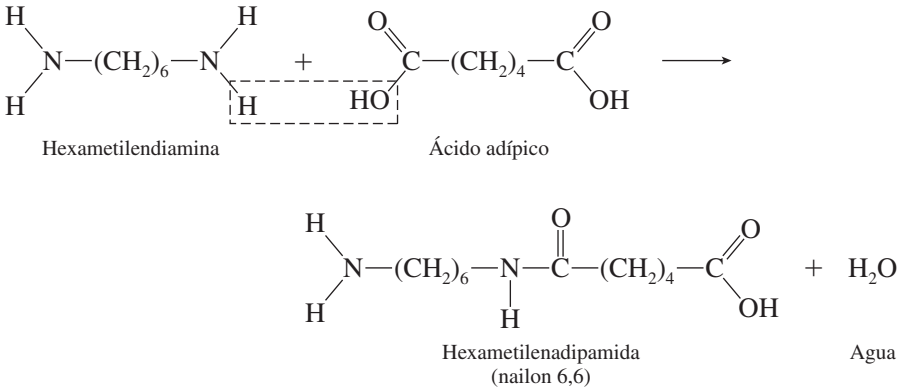


Figura 10.10
Reacción de polimerización de hexametilendiamina con ácido adípico para producir una unidad de nailon 6,6.

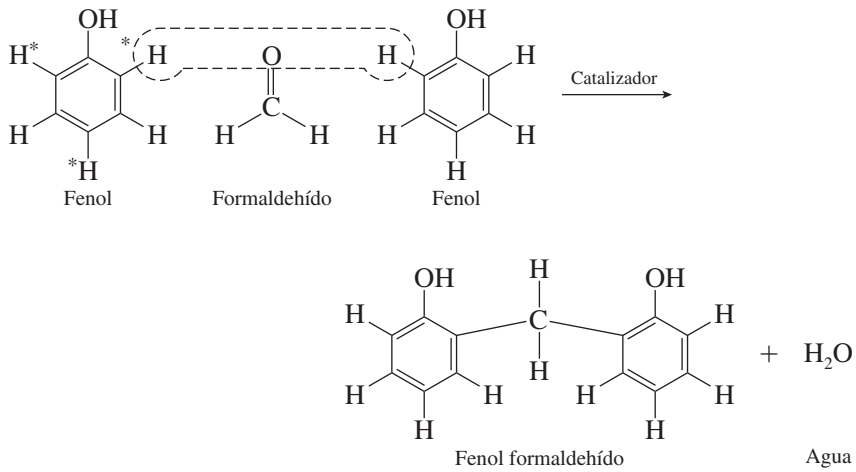


Figura 10.11
Reacción de polimerización del fenol (los asteriscos representan los sitios de reacción) con formaldehído para producir un enlace unitario de resina fenólica.

rial plástico reticular de tres dimensiones. Este tipo de polimerización se da al momento de curar los plásticos termofijos, por ejemplo los fenólicos, epóxicos y algunos poliésteres. La reacción de polimerización de dos moléculas de fenol y una molécula de formaldehído se muestra en la figura 10.11. Obsérvese que se forma una molécula de agua como subproducto de la reacción. La molécula de fenol es trifuncional y en presencia de un catalizador adecuado y de calor y presión suficientes, se puede polimerizar con formaldehído y formar un material plástico fenólico termofijo reticular que a veces se conoce con el nombre comercial de *baquelita*.

10.3 MÉTODOS INDUSTRIALES DE POLIMERIZACIÓN

En esta etapa se podría preguntar cómo se producen industrialmente los materiales plásticos. La respuesta a esta pregunta no es sencilla, porque son procesos muy diferentes y novedosos los que se usan y además se están desarrollando constantemente. Para empezar, se usan materias primas básicas como *gas natural*, *petróleo* y *carbón* en la producción de las sustancias químicas básicas para los procesos de la polimerización. Estas sustancias químicas se polimerizan después mediante muchos procesos diferentes para formar materiales plásticos en forma de gránulos, grageas, polvos o líquidos, los cuales posteriormente se procesan para elaborar los productos terminados. Los procesos de polimerización química que se utilizan para producir materiales plásticos son complejos y diversos. El ingeniero químico desempeña un importante papel en su desarrollo y en su utilización industrial. Algunos de los métodos de polimerización más importantes se esbozan en los siguientes párrafos y se ilustran en las figuras 10.12 y 10.13.

Polimerización en masa (figura 10.12*a*). El monómero y el iniciador se mezclan en un reactor que se calienta y se enfría según se requiera. Este proceso se usa ampliamente para la polimerización por condensación donde un monómero puede cargarse en el reactor y el otro se añade lentamente. El proceso en masa puede utilizarse para múltiples reacciones de polimerización por condensación en virtud de que sus calores de reacción son bajos.

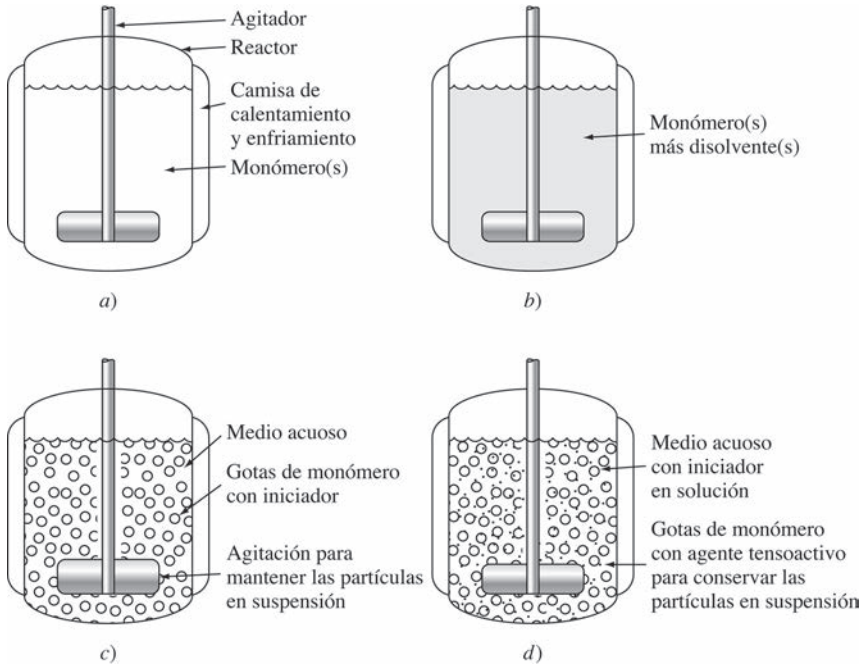
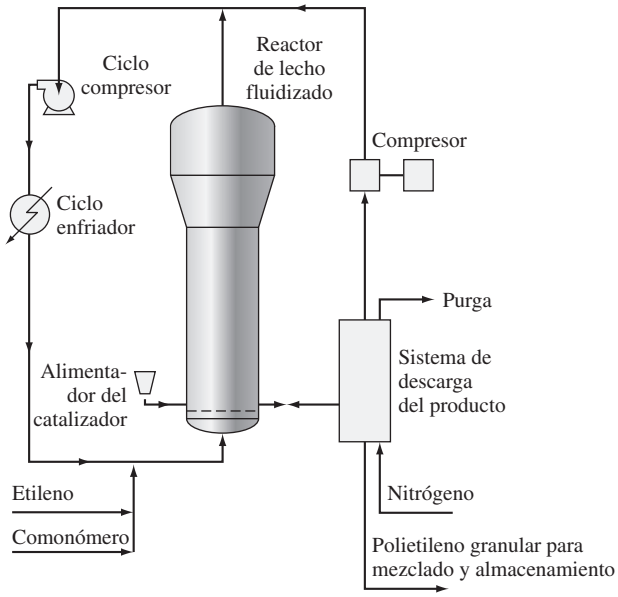


Figura 10.12
Ilustración esquemática de algunos métodos de polimerización industrial usados comúnmente: *a*) en masa, *b*) en solución, *c*) en suspensión y *d*) en emulsión.
(Según W. E. Driver, "Plastics Chemistry and Technology", Van Nostrand Reinhold, 1979, p. 19.)



a)

b)

Figura 10.13
Proceso de polimerización en fase gaseosa para polietileno de baja densidad. *a*) Diagrama de flujo que indica los pasos básicos del proceso. *b*) Reactores gemelos utilizados en el proceso. *(Según Chemical Engineering, 3 de diciembre de 1979, pp. 81, 83.)*

Polimerización en solución (figura 10.12*b*). El monómero se disuelve en un disolvente no reactivo que contiene un iniciador. El calor desprendido por la reacción es absorbido por el disolvente y, por tanto, la velocidad de reacción se reduce.

Polimerización en suspensión (figura 10.12*c*). El monómero se mezcla con un iniciador y luego se dispersa como una suspensión en agua. En este proceso, el calor desprendido por la reacción es absorbido por el agua. Después de la polimerización, el producto polimerizado se separa y se seca. Este proceso se usa comúnmente para producir gran número de polímeros de tipo vinilo, como policloruro de vinilo, poliestireno, poliacrilonitrilo y polimetilmetacrilato.

Polimerización en emulsión (figura 10.12*d*). Este proceso de polimerización es similar al proceso de suspensión porque se lleva a cabo en agua. Sin embargo, se añade un emulsionante para dispersar el monómero en partículas muy pequeñas.

Además de los procesos de polimerización por lotes que se acaban de describir, se han desarrollado muchos tipos de procesos de polimerización continua en masa, y la investigación y el desarrollo en esta área continúan. Uno de los procesos más importantes[3] es el proceso Unipol en fase gaseosa de Union Carbide para producir poli-

[3] *Chemical Engineering*, 3 de diciembre de 1979, p. 80.

etileno de baja densidad. En este proceso, el monómero de etileno en forma gaseosa junto con algún comonómero son alimentados continuamente en el reactor de lecho fluidizado, al cual se le añade un catalizador especial (figura 10.13*a*). Las ventajas de este proceso son la baja temperatura para la polimerización (100°C en vez de los 300°C del antiguo proceso) y la baja presión (100 psi en vez de las 300 psi del antiguo proceso). Muchas plantas industriales ya están usando el proceso Unipol.

10.4 CRISTALINIDAD Y ESTEREOISOMERISMO EN ALGUNOS TERMOPLÁSTICOS

Cuando se solidifica un termoplástico a partir del estado líquido, se forma ya sea un sólido no cristalino o uno parcialmente cristalino. Enseguida se investigarán algunas de las características estructurales y de solidificación de estos materiales.

10.4.1 Solidificación de termoplásticos no cristalinos

Primero se examinará la solidificación y el enfriamiento lento a bajas temperaturas, de un termoplástico no cristalino. Cuando los termoplásticos no cristalinos se solidifican, no hay una disminución repentina del volumen específico (volumen por unidad de masa) a medida que la temperatura disminuye (figura 10.14). El líquido bajo solidificación cambia a un líquido superenfriado que se encuentra en estado sólido y muestra una disminución gradual del volumen específico con la disminución de temperatura, como se indica a lo largo de la línea *ABC* en la figura 10.14.

Cuando este material se enfría a menores temperaturas, se presenta un cambio en la pendiente de la curva de volumen específico contra temperatura, como se indica en *C* y *D* de la curva *ABCD* de la figura 10.14. La temperatura promedio dentro del estrecho rango de temperatura en el cual la pendiente de la curva cambia, se conoce como la **temperatura de transición vítrea** T_g. Arriba de T_g, los termoplásticos no cristalinos muestran un comportamiento viscoso (como de caucho o cuero flexible), y abajo de T_g, estos materiales se muestran frágiles como el vidrio. En ciertos aspectos, T_g puede considerarse como una temperatura de transición de dúctil a frágil. Por debajo de T_g, el material es frágil como vidrio debido a que el movimiento de las cadenas moleculares es muy restringido. En la figura 10.15 se muestra una gráfica experimental del volumen específico contra la temperatura, para polipropileno no cristalino, que muestra un cambio en la pendiente de la T_g de este material a −12°C. En la tabla 10.1 se presenta una lista de valores de T_g para algunos termoplásticos.

10.4.2 Solidificación de termoplásticos parcialmente cristalinos

Ahora se examinará la solidificación y el enfriamiento, a bajas temperaturas, de un termoplástico parcialmente cristalino. Cuando este material se solidifica y se enfría, se presenta una repentina disminución del volumen específico, como lo indica la línea *BE* en la figura 10.14. Esta disminución del volumen específico es causada por un empaquetamiento más eficiente de las cadenas del polímero formando regiones cristalinas. La estructura del termoplástico parcialmente cristalino en *E* será, por tanto, la de las regiones cristalinas en una matriz no cristalina de líquido superenfriado (sólido viscoso). A medi-

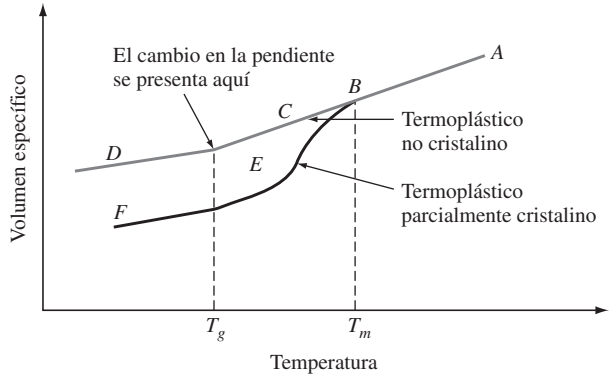


Figura 10.14
Solidificación y enfriamiento de termoplásticos no cristalinos y parcialmente cristalinos mostrando un cambio en el volumen específico con respecto a la temperatura (esquemático). T_g es la temperatura de transición vítrea y T_m es la temperatura de fusión. Un termoplástico no cristalino se enfría a lo largo de la línea *ABCD*, donde *A* = líquido, *B* = líquido altamente viscoso, *C* = líquido superenfriado (caucho) y *D* = sólido vítreo (duro y frágil). El termoplástico parcialmente cristalino se enfría a lo largo de la línea *ABEF*, donde *E* = regiones de sólido cristalino en matriz de líquido superenfriado y *F* = regiones de sólido cristalino en matriz vítrea.

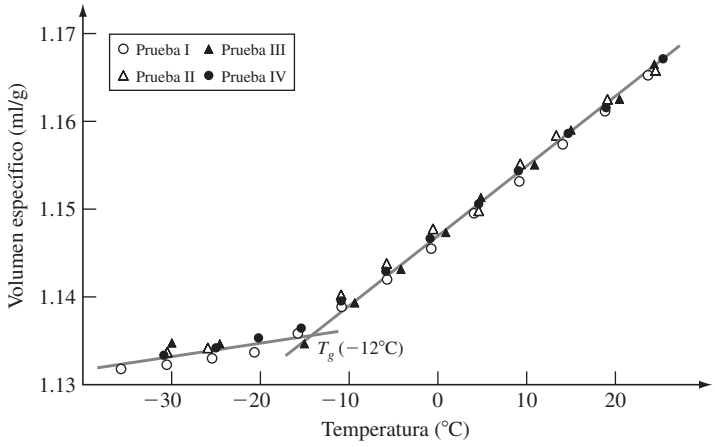
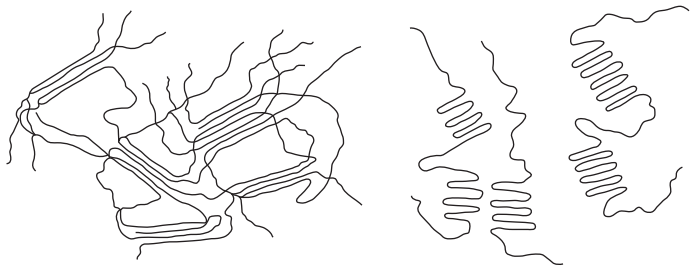


Figura 10.15
Datos experimentales de volumen específico *versus* temperatura para la determinación de la temperatura de transición vítrea del polipropileno atáctico. T_g está a –12°C.
[Según D. L. Beck, A. A. Hiltz y J. R. Knox, Soc. Plast. Eng. Trans, **3:***279(1963).]*

Tabla 10.1 Temperatura de transición vítrea T_g* (°C) para algunos termoplásticos

Polietileno	−110	(nominal)
Polipropileno	−18	(nominal)
Poliacetato de vinilo	29	
Policloruro de vinilo	82	
Poliestireno	75-100	
Polimetilmetacrilato	72	

*Obsérvese que la T_g de un termoplástico no es una constante física como la temperatura de fusión de un sólido cristalino, sino que depende en cierta medida de variables tales como el grado de **cristalinidad**, el peso molecular promedio de las cadenas del polímero y la velocidad de enfriamiento del termoplástico.



a) *b*)

Figura 10.16
Dos arreglos propuestos para la cristalita en materiales termoplásticos parcialmente cristalinos. *a*) Modelo con franjas de micela y *b*) modelo de cadena plegada.
(Según F. Rodriguez, "Principles of Polymer Systems", 2a. ed., McGraw-Hill, 1982, p. 42.)

da que continúa el enfriamiento, se alcanza la transición vítrea, como lo indica el cambio de la pendiente del volumen específico *versus* la temperatura en la figura 10.14 entre *E* y *F*. Al avanzar en la transición vítrea, la matriz de líquido superenfriado se transforma al estado vítreo y, por consiguiente, la estructura del termoplástico en *F* consta de regiones cristalinas en una matriz vítrea no cristalina. Un ejemplo de un termoplástico que se solidifica para formar una estructura parcialmente cristalina es el polietileno.

10.4.3 Estructura de los materiales termoplásticos parcialmente cristalinos

Todavía hay dudas respecto a la forma exacta en que las moléculas de un polímero están dispuestas en una estructura cristalina; aún se requiere más investigación en esta área. La mayor longitud de las regiones cristalinas o cristalitas en los materiales poliméricos policristalinos es, en general, de 5 a 50 nm, aproximadamente. Esto es un pequeño porcentaje de la longitud de la molécula del polímero totalmente extendida, la cual puede ser de, aproximadamente, 5 000 nm. Un modelo previo, llamado *modelo de flecos de micelas*, representa largas cadenas de polímero de, aproximadamente, 5 000 nm que se manifiestan sucesivamente a través de series de regiones desordenadas y ordenadas en toda la longitud de la molécula del polímero (figura 10.16*a*). Un modelo más reciente llamado el *modelo de cadena plegada*, muestra secciones de ca-

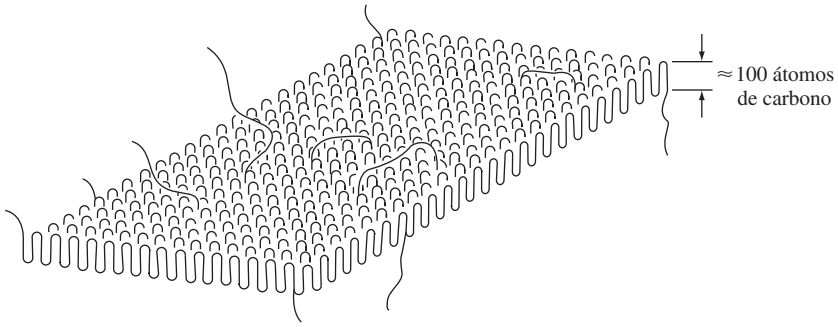


Figura 10.17
Estructura esquemática de cadena plegada de una lamela de polietileno de baja densidad.
[(Según R. L. Boysen, Olefin Polymers (High-Pressure Polyethylene), en "Encyclopedia of Chemical Technology", vol. 16, Wiley, 1981, p. 405.)]

denas moleculares plegadas sobre sí mismas de modo que es posible una transición de las regiones cristalinas a las regiones no cristalinas (figura 10.16*b*).

En los últimos años se han estudiado en forma intensiva los termoplásticos parcialmente cristalinos, en especial el polietileno. Se cree que el polietileno cristaliza con una estructura de cadena plegada con una celda ortorrómbica, como se muestra en la figura 10.17. La longitud de la cadena entre los pliegues es de 100 átomos de carbono, aproximadamente, y a cada capa en particular de la estructura de cadena plegada se le conoce como *lamela.* En condiciones de laboratorio, el polietileno de baja densidad cristaliza en una estructura de tipo esferulita como la que aparece en la figura 10.18. Las regiones con esferulitas, que están constituidas por lamelas cristalinas, son las áreas oscuras, y las regiones entre las estructuras de las esferulitas son áreas blancas no cristalinas. La estructura de esferulita que aparece en la figura 10.18 crece únicamente bajo un cuidadoso control, en condiciones de laboratorio libres de deformaciones.

El grado de cristalinidad de los materiales poliméricos lineales parcialmente cristalinos varía entre 5 y 95 por ciento de su volumen total. La cristalización completa no se alcanza ni siquiera con materiales poliméricos que son altamente cristalizables debido a las marañas y entrecruzamientos moleculares. La cantidad de material cristalino que existe dentro de un termoplástico afecta su resistencia a la tensión. En general, cuando el grado de cristalinidad aumenta, la resistencia del material aumenta también.

10.4.4 Estereoisomerismo en los termoplásticos

Los **estereoisómeros** son compuestos moleculares que tienen las mismas composiciones químicas, pero diferentes arreglos estructurales. Algunos termoplásticos, como el polietileno, pueden existir en tres formas estereoisoméricas diferentes:

1. **Estereoisómero atáctico.** El grupo metilo colgante del polipropileno está dispuesto aleatoriamente a cada lado de la cadena de carbono principal (figura 10.19*a*).
2. **Estereoisómero isotáctico.** El grupo metilo colgante está siempre del mismo lado de la cadena de carbono principal (figura 10.19*b*).

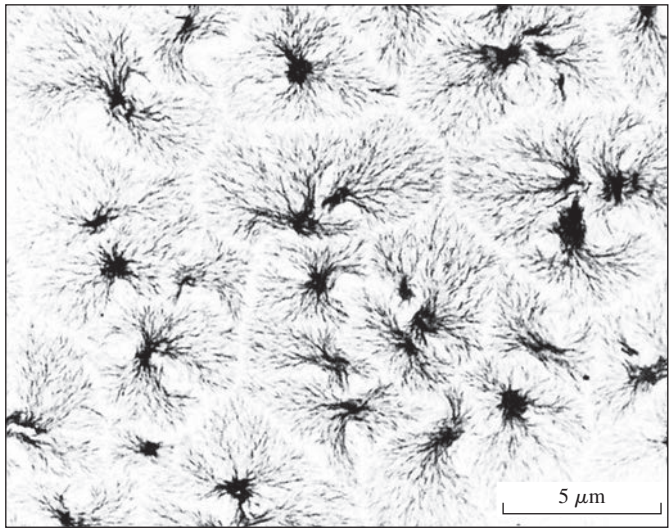


Figura 10.18
Estructura con esferulitas en una película fundida de polietileno de baja densidad; densidad 0.92 g/cm^3.
[Según R. L. Boysen, Olefin Polymers (High-Pressure Polyethylene), en "Encyclopedia of Chemical Technology", vol. 16, Wiley, 1981, p. 406.]

3. Estereoisómero sindiotáctico. El grupo colgante se alterna en forma regular de uno a otro lado de la cadena principal (figura 10.19*c*).

El descubrimiento de un catalizador que hizo posible la polimerización industrial de polímeros isotácticos de tipo lineal fue un gran avance en la industria de los plásticos. Con un **catalizador estereoespecífico**, el polipropileno isotáctico podría producirse a escala comercial. El polipropileno isotáctico es un material polimérico altamente cristalino con un punto de fusión de 165 a 175°C. Debido a su alta cristalinidad, el propileno isotáctico tiene resistencias y temperaturas de deflexión térmica más altas que el polipropileno atáctico.

10.4.5 Catalizadores de Ziegler y Natta

Karl Ziegler y Giulio Natta fueron galardonados con el premio Nobel de Química 1963 por su trabajo sobre polietilenos lineales y estereoisómeros del polipropileno. Se han escrito muchos libros sobre esta materia y los detalles rebasan los objetivos de este libro, pero aquí se dan referencias para quienes deseen profundizar en este tema. En suma, los iniciadores a base de metalocenos se usan conjuntamente con el producto. Los metalocenos no son verdaderos catalizadores en virtud de que ellos *sí* participan en las reacciones y en el curso de ellas son consumidos en pequeñas cantidades. Por tanto, los iniciadores de metaloceno han abierto una nueva era para la polimerización de las poliolefinas.

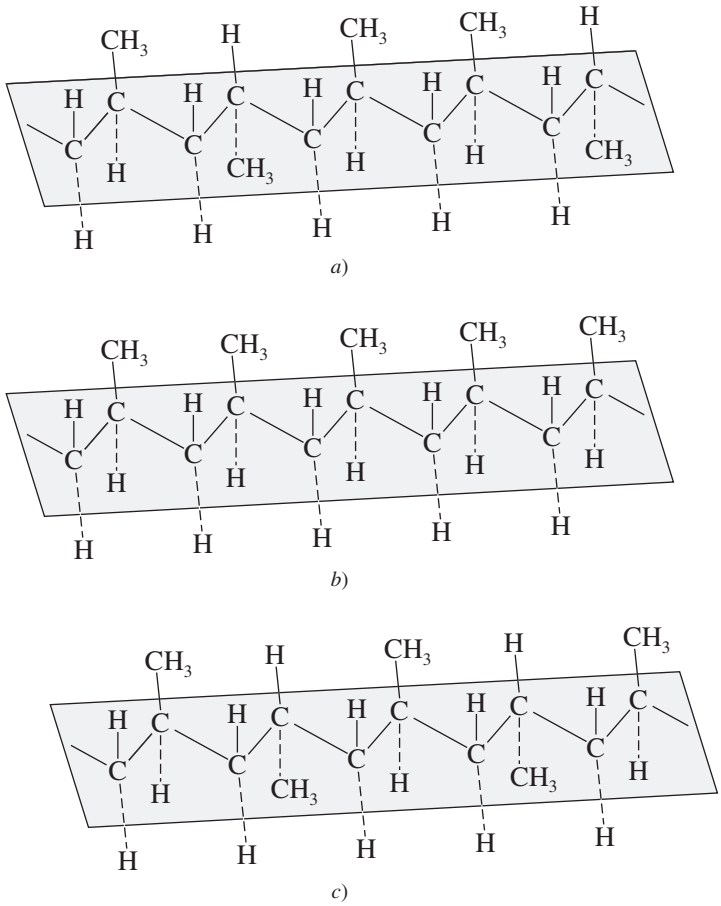


Figura 10.19
Estereoisómeros de polipropileno. *a*) Isómero atáctico en el cual los grupos colgantes CH_3 están dispuestos aleatoriamente a cada lado de los carbonos de la cadena principal. *b*) Isómero isotáctico en el que todos los grupos colgantes de CH_3 están del mismo lado que los carbonos de la cadena principal. *c*) Isómero sindiotáctico en el cual los grupos colgantes CH_3 se alternan regularmente de un lado al otro de los carbonos de la cadena principal.
[Según G. Crespi y L. Luciani, Olefin Polymers (Polyethylene), en "Encyclopedia of Chemical Technology", vol. 16, Wiley, 1982, p. 454.]

10.5 PROCESADO DE LOS MATERIALES PLÁSTICOS

Se usan procesos muy diferentes para transformar los gránulos y pellets en productos en forma de láminas, barras, secciones extrudidas, tubos o partes moldeadas terminadas. El proceso empleado depende en cierta medida de si el material es termoplástico o termofijo. Generalmente los termoplásticos se calientan hasta que se suavizan y lue-

go se les da una nueva forma antes de enfriarlos. Por otra parte, con los materiales termofijos que no han sido completamente polimerizados antes de ser procesados para darles forma final, se usa un proceso por el cual se lleva a cabo una reacción química para entrecruzar las cadenas del polímero formándose una red de material polimérico. La polimerización final se puede llevar a cabo mediante la aplicación de calor y presión o por acción catalítica a temperatura ambiente o a temperaturas más altas.

En esta sección se tratarán algunos de los procesos más importantes que se usan con materiales termoplásticos y termoestables.

10.5.1 Procesos utilizados con los materiales termoplásticos

Moldeo por inyección El **moldeo por inyección** es uno de los métodos de procesado más importantes que se usan para dar forma a los materiales termoplásticos. La máquina moderna de moldeo por inyección utiliza un mecanismo de mono husillo para derretir el plástico e inyectarlo en un molde (figuras 10.20 a 10.22). Las máquinas de moldeo por inyección de tipo antiguo usan un émbolo para inyectar el material fundido. Una de las principales ventajas del método del mono husillo sobre los de tipo émbolo es que el tornillo impulsor entrega un material fundido más homogéneo para la inyección.

En el proceso de moldeo por inyección, los gránulos de plástico son alimentados en el cilindro de inyección a través de una abertura, desde una tolva, sobre la superficie de un tornillo rotatorio que los transporta hacia adelante en dirección al molde (fi-

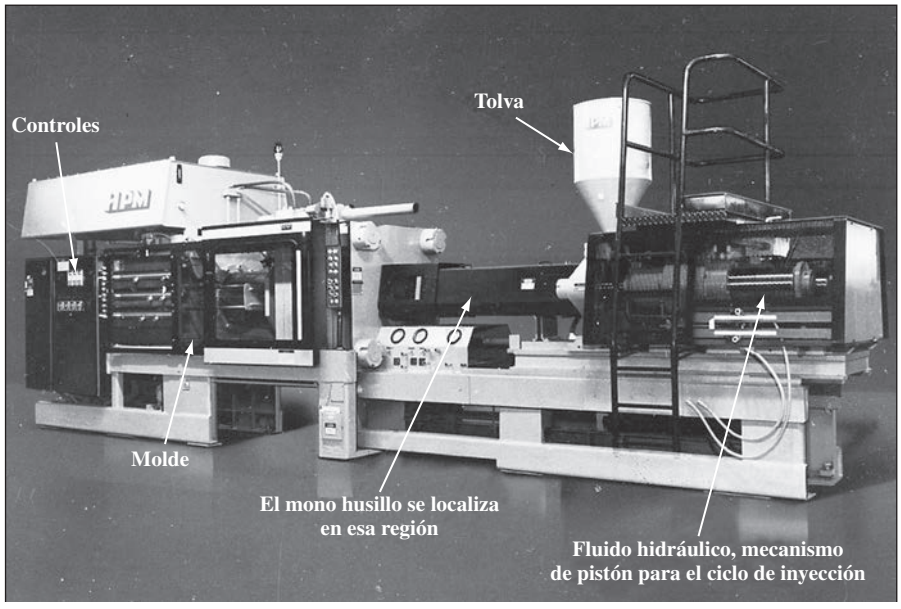


Figura 10.20
Vista frontal de una máquina de moldeo por inyección con mono husillo para materiales plásticos.
(Cortesía de HPM Corporation.)

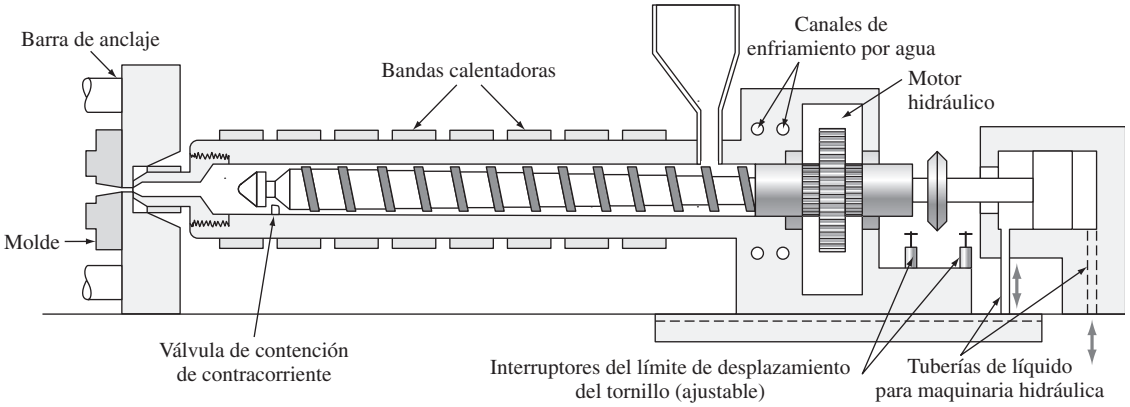


Figura 10.21
Sección transversal de la máquina de moldeo por inyección con mono husillo.
(Según J. Bown, "Injection Molding of Plastic Components", McGraw-Hill, 1979, p. 28.)

gura 10.22*a*). La rotación del tornillo fuerza a los gránulos contra las paredes precalentadas del cilindro, lo cual hace que se fundan por el calor de la compresión, la fricción y las paredes calientes del cilindro (figura 10.22*b*). Cuando se funde suficiente material plástico en el extremo del tornillo unido al molde, el tornillo se detiene, y mediante un movimiento similar al de un pistón inyecta un "disparo" de plástico fundido a través de un sistema de puerta corrediza a partir del cual el plástico llega hasta las cavidades cerradas del molde (figura 10.22*c*). El eje de tornillo mantiene la presión sobre el material plástico alimentado en el molde por un corto tiempo a fin de dejar que se vuelva sólido, y luego se retrae. El molde se enfría con agua para permitir el enfriamiento rápido de la parte plástica. Por último, se abre el molde y la parte es extraída de éste con aire o con pivotes eyectores accionados por muelles (figura 10.22*d*). Entonces el molde se cierra y está listo para otro ciclo.

Las principales ventajas del moldeo por inyección son:

1. Se pueden producir piezas de alta calidad a una alta velocidad de producción.
2. Los costos de la mano de obra del proceso son relativamente bajos.
3. Se pueden producir buenos acabados en la superficie de la pieza moldeada.
4. El proceso puede ser altamente automatizado.
5. Se pueden producir formas complicadas.

Las principales desventajas del moldeo por inyección son:

1. El alto costo de la maquinaria impone la necesidad de producir un gran volumen de piezas para que su uso sea rentable.
2. El proceso se debe controlar cuidadosamente para elaborar un producto de calidad.

Extrusión La **extrusión** es otro de los importantes métodos de procesado que se emplean para producir termoplásticos. Algunos productos manufacturados por el proceso de extrusión son tuberías, varillas, películas, láminas y formas de todo tipo. La máquina de extrusión se usa también para fabricar materiales plásticos compuestos

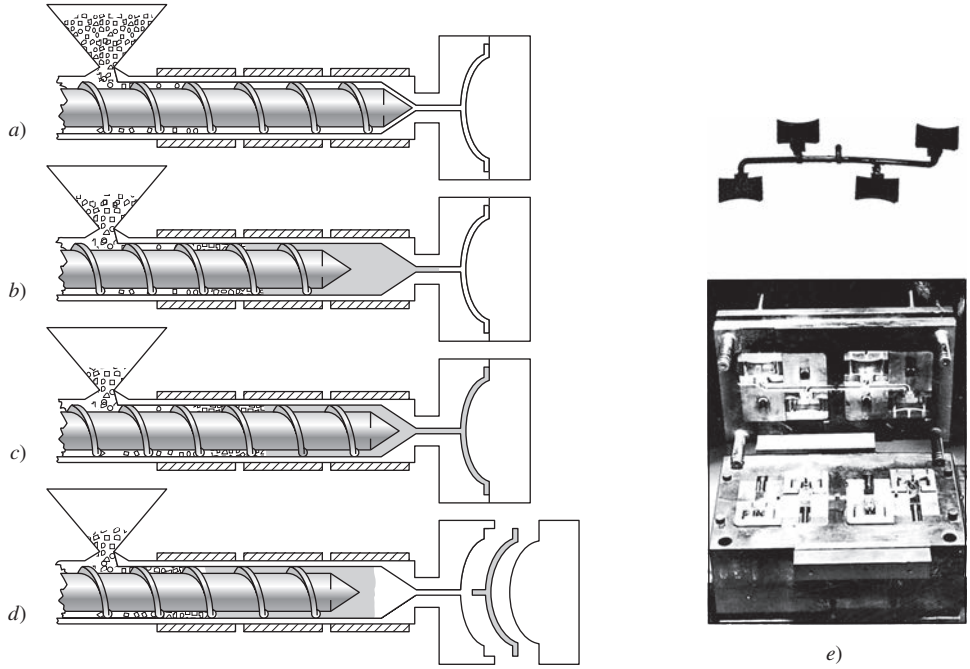


Figura 10.22
Secuencia de operaciones en el proceso de moldeo por inyección de materiales plásticos con una extrusora de mono husillo. *a*) Los gránulos de plástico son transportados por un pistón de tornillo giratorio. *b*) Los gránulos de plástico se funden a medida que se desplazan por el husillo a lo largo del tornillo giratorio y cuando ya se ha fundido suficiente material en el extremo del tornillo, éste deja de girar. *c*) El pistón del tornillo es impulsado hacia adelante e inyecta el plástico fundido, a través de una abertura, en un sistema de puerta corrediza y luego en la cavidad de un molde cerrado. *d*) El pistón del tornillo se retrae y la pieza de plástico terminada es expulsada. *e*) Troqueles de molde abierto mostrando la parte de plástico extraída arriba.
(Cortesía de Plastics Engineering Co., Sheboygan, Wisc.)

destinados a la producción de formas básicas de fabricación como pellets, y para la recuperación de residuos de materiales termoplásticos.

En el proceso de extrusión, la resina termoplástica es alimentada en un cilindro calentado y el plástico fundido es forzado mediante un tornillo giratorio a través de una abertura (o aberturas) en un troquel maquinado con precisión para producir formas continuas (figura 10.23). Después de salir del troquel, la parte extrudida debe ser enfriada por debajo de su temperatura de transición vítrea para asegurar su estabilidad dimensional. El enfriamiento se realiza generalmente bajo un chorro de aire o con un sistema de enfriamiento por agua.

Moldeo por soplado y termoformado Otros métodos importantes de procesado de los termoplásticos son el moldeo por soplado y el termoformado de láminas. En el **moldeo por soplado**, un cilindro o tubo de plástico caliente, llamado *parison*, se coloca entre las mordazas de un molde (figura 10.24*a*). El molde se cierra para excluir

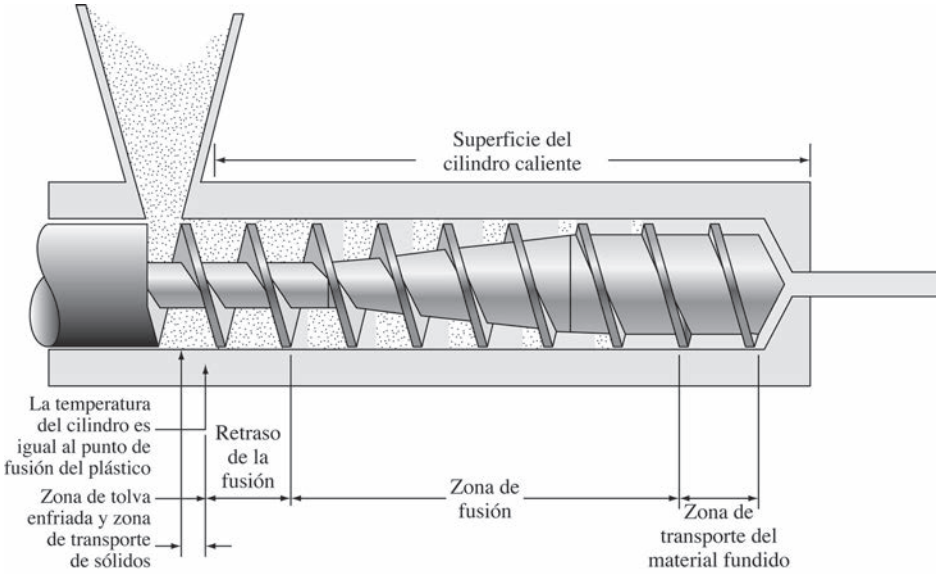


Figura 10.23
Representación esquemática de una extrusora que muestra las diversas zonas funcionales: tolva, zona de transporte de sólidos, retardador del inicio del fundido, zona de fundido y zona de bombeo del fundido.
[Según H. S. Kaufman y J. J. Falcetta (eds.), "Introduction to Polymer Science and Technology", Society of Plastic Engineers, Wiley, 1977, p. 462.]

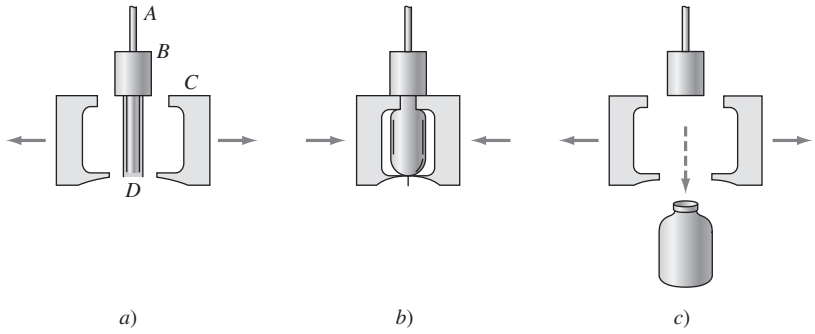


Figura 10.24
Secuencia de pasos en el moldeo por soplado de una botella de plástico. *a*) Una sección del tubo se introduce en el molde. *b*) El molde se cierra y el fondo del tubo es sujetado por el molde. *c*) Se sopla aire a presión a través del molde al interior del tubo, y éste se expande para llenar el molde; la parte es enfriada manteniéndola bajo la presión del aire. *A* = línea de aire, *B* = troquel, *C* = molde, *D* = sección del tubo.
(Según P. N. Richardson, Plastics Processing, en "Encyclopedia of Chemical Technology", vol. 18, Wiley, 1982, p. 198.)

los extremos del cilindro (figura 10.24*b*) y se insufla en él un chorro de aire comprimido que empuja al plástico contra las paredes del molde (figura 10.24*c*).

En el *termoformado*, una lámina de plástico calentada es forzada a adaptarse a los contornos de un molde por medio de presión. Se puede aplicar presión mecánica con troqueles coincidentes o se puede usar vacío para que la lámina calentada se acople al interior de un troquel abierto. También se puede usar aire a presión para forzar a la lámina calentada hacia el interior de un troquel abierto.

10.5.2 Procesos utilizados con los materiales termofijos

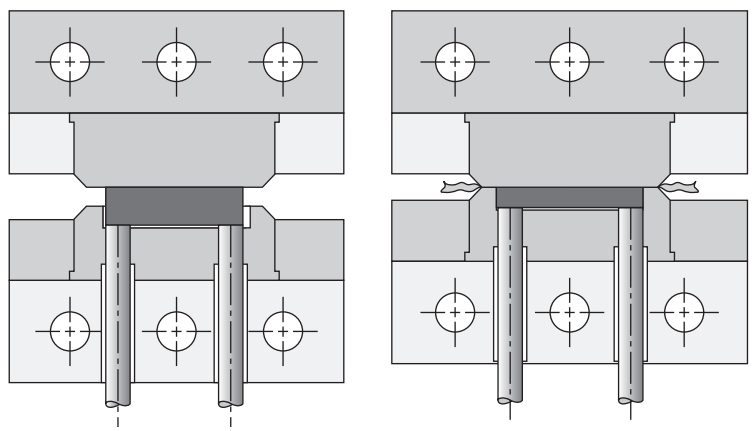
Moldeo por compresión Muchas resinas termofijas, como las de fenol-formaldehído, urea-formaldehído y melamina-formaldehído, son moldeadas como piezas sólidas mediante el proceso de moldeo por compresión. En el **moldeo por compresión** la resina plástica, que puede estar precalentada, se carga en un molde caliente que tiene una o varias cavidades (figura 10.25*a*). La parte superior del molde es presionada hacia abajo sobre la resina plástica y la presión aplicada y el calor funden la resina y fuerzan al plástico licuado a llenar la cavidad o cavidades (figura 10.25*b*). Es necesario continuar con el calentamiento (generalmente un minuto o dos) para completar los enlaces entrecruzados de la resina termoestable y luego se extrae la pieza del molde. La rebaba excedente se recorta de la pieza más tarde.

Las ventajas del moldeo por compresión son:

1. Debido a la relativa sencillez de los moldes, el costo inicial de éstos es bajo.

2. El flujo relativamente corto del material reduce el desgaste y la abrasión de los moldes.

3. La producción de piezas grandes es más factible.



a) *b*)

Figura 10.25
Moldeo por compresión. *a*) Sección transversal de un molde abierto que contiene una forma pulverizada preformada en la cavidad del mismo. *b*) Sección transversal del molde cerrado mostrando el espécimen moldeado y las rebabas excedentes.
(Según R. B. Seymour, Plastics Technology, en "Encyclopedia of Chemical Technology", vol. 15, Wiley, 1968, p. 802.)

4. Es posible que los moldes sean más compactos debido a la sencillez del molde.

5. Los gases que se desprenden de la reacción de curado pueden escapar durante el proceso de moldeo.

Las desventajas del moldeo por compresión son:

1. Con este proceso es difícil obtener piezas con formas complicadas.

2. Puede ser difícil mantener los insertos dentro de los márgenes de tolerancia.

3. Es necesario recortar las rebabas de las piezas moldeadas.

Moldeo por transferencia El **moldeo por transferencia** se usa también para el moldeo de plásticos termofijos; por ejemplo, fenólicos, ureas, melaminas y resinas alquídicas. El moldeo por transferencia difiere del moldeo por compresión por la forma en que se introduce el material en las cavidades del molde. En el moldeo por transferencia, la resina plástica no es alimentada directamente en las cavidades del molde sino en una cámara exterior a dichas cavidades (figura 10.26*a*). En el mol-

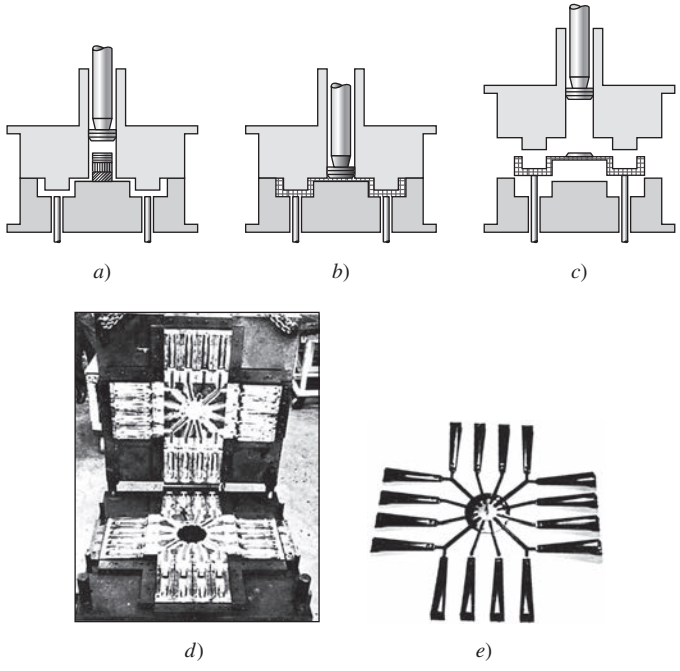


Figura 10.26
Moldeo por transferencia. *a*) La forma preformada del plástico es empujada por un émbolo al interior de un molde previamente cerrado. *b*) Se aplica presión sobre la forma de plástico y éste es forzado a pasar a través de un sistema de canales y compuertas a las cavidades del molde. *c*) Después que el plástico ha fraguado, el émbolo es retirado y se abre la cavidad del molde. Entonces se extrae la pieza. *d*) Molde abierto mostrando sus cavidades. *e*) Pieza de plástico extraída.
(Cortesía de Plastics Engineering Co., Sheboygan, Wisc.)

deo por transferencia, cuando se cierra el molde, un émbolo empuja la resina plástica (que generalmente está precalentada) desde la cámara exterior, a través de un sistema de canales y compuertas, hasta las cavidades del molde (figura 10.26*b*). Después que el material moldeado ha tenido tiempo de curarse, de modo que se forme el material polimérico reticular rígido, la pieza moldeada es extraída del molde (figura 10.26*c*). En la figura 10.26*d* se muestran las cavidades de un molde de transferencia abierto y en la figura 10.26*e* se muestra el material plástico tal como sale del molde, conteniendo todavía múltiples piezas de plástico termofijo.

Las ventajas del moldeo por transferencia son:

1. El moldeo por transferencia tiene la ventaja, sobre el moldeo por compresión, de que no se forman rebabas durante el moldeo y, por tanto, la pieza moldeada requiere menos acabado.

2. Se pueden elaborar muchas piezas al mismo tiempo usando un sistema de canales de colada (figura 10.26*e*).

3. El moldeo por transferencia es especialmente útil para elaborar piezas pequeñas y complejas que sería difícil hacer mediante el moldeo por compresión.

Moldeo por inyección Con la tecnología moderna es posible moldear por inyección algunos compuestos termofijos utilizando máquinas de moldeo por inyección de mono husillo. Se han incorporado camisas especiales de refrigeración y de calentamiento a las máquinas de moldeo por inyección de tipo estándar, con lo cual la resina puede ser curada en el mismo proceso. Se requiere una buena ventilación de las cavidades del molde en el caso de algunas resinas termofijas que generan productos de reacción durante el curado. En virtud de la eficiencia de este proceso, el moldeo por inyección para producir piezas termofijas se volverá probablemente más importante en el futuro.

10.6 TERMOPLÁSTICOS DE USO GENERAL

En esta sección se tratarán algunos aspectos importantes de la estructura, el procesado químico, las propiedades y las aplicaciones de los siguientes termoplásticos: polietileno, policloruro de vinilo, polipropileno, poliestireno, ABS, polimetilmetacrilato, poliacetato de celulosa y materiales relacionados con él, y el politetrafluoroetileno.

Sin embargo, en primer lugar se examinarán los tonelajes de ventas, las listas de precios y algunas de las propiedades importantes de estos materiales.

Tonelajes de ventas globales y precios de lista a granel de algunos termoplásticos de uso general Con base en los tonelajes de las ventas globales de ciertos termoplásticos en 1998, junto con sus listas de precios a granel en 2000, se observa que cuatro de los materiales plásticos principales (polietileno, policloruro de vinilo, polipropileno y poliestireno) se encuentran entre los más vendidos. Estos materiales tienen un costo relativamente bajo, de unos 50¢/lb (precios de 2000), que, sin duda, explican en parte la razón de su amplio uso en la industria y en numerosas aplicaciones de ingeniería. Sin embargo, cuando se requieren propiedades especiales que no se obtienen con los termoplásticos más baratos, se usan materiales plásticos costosos. Por ejemplo, el politetrafluoroetileno (Teflón), que tiene propiedades especiales de lubricación y comportamiento en altas temperaturas, costaba entre cinco y nueve dólares por libra en 2000.

Tabla 10.2 Algunas propiedades de termoplásticos selectos de uso general

Material	Densidad (g/cm^3)	Resistencia a la tensión (×1 000 psi)*	Resistencia al impacto, Izod (pie · lb/pulg)†	Resistencia dieléctrica (V/mil)‡	Temp. máx. de uso (sin carga) °F	Temp. máx. de uso (sin carga) °C
Polietileno:						
Baja densidad	0.92-0.93	0.9-2.5		480	180-212	82-100
Alta densidad	0.95-0.96	2.9-5.4	0.4-14	480	175-250	80-120
PVC clorado, rígido	1.49-1.58	7.5-9	1.0-5.6		230	110
Polipropileno, uso general	0.90-0.91	4.8-5.5	0.4-2.2	650	225-300	107-150
Estireno-acrilonitrilo (SAN)	1.08	10-12	0.4-0.5	1775	140-220	60-104
ABS, uso general	1.05-1.07	5.9	6	385	160-200	71-93
Acrílico, uso general	1.11-1.19	11.0	2.3	450-500	130-230	54-110
Acetatos celulósicos	1.2-1.3	3-8	1.1-6.8	250-600	140-220	60-104
Politetrafluoroetileno	2.1-2.3	1-4	2.5-4.0	400-500	550	288

*1 000 psi = 6.9 MPa.
†Prueba Izod con muesca: 1 pie · lb/pulg = 53.38 J/m.
‡1 V/mil = 39.4 V/mm.
Fuente: *Materials Engineering,* mayo de 1972.

Algunas propiedades básicas de termoplásticos seleccionados de uso general En la tabla 10.2 se presenta la lista de densidades, resistencias a la tensión, resistencias al impacto, resistencias dieléctricas y temperaturas máximas de uso para algunos termoplásticos seleccionados de uso general. Una de las ventajas más importantes de muchos materiales plásticos para gran número de aplicaciones de ingeniería consiste en que sus densidades son relativamente bajas. La mayoría de los plásticos de uso general tienen densidades de cerca de 1, en comparación con la densidad de 7.8 del hierro.

Las resistencias a la tensión de los materiales plásticos son relativamente bajas y, en consecuencia, esta propiedad puede convertirse en desventaja en algunos diseños de ingeniería. En su mayoría, los materiales plásticos tienen una resistencia a la tensión de menos de 10 000 psi (69 MPa) (tabla 10.2). La prueba de tensión para materiales plásticos se lleva a cabo con el mismo equipo que se usa para los metales (figura 6.18).

La prueba de impacto que se usa en general con materiales plásticos es la prueba Izod con muesca. En esta prueba se usa normalmente una muestra de $\frac{1}{8} \times \frac{1}{2} \times 2\frac{1}{2}$ pulg (figura 10.27), la cual se sujeta a la base de una máquina de prueba con péndulo. Se mide la cantidad de energía absorbida por unidad de longitud de la muesca (mellado) ocasionada por el péndulo al golpear la muestra y este valor se denomina *resistencia al impacto con muesca* del material. Esta energía se expresa de ordinario en pies libras por pulgada (pies · lb/pulg) o en joules por metro (J/m). La resistencia al impacto con muesca de los materiales plásticos de uso general de la tabla 10.2 varía entre 0.4 y 14 pies · lb/pulg.

En general, los materiales plásticos son buenos aislantes eléctricos. La resistencia como aislante eléctrico de los materiales plásticos se mide comúnmente por su *resistencia dieléctrica*, la cual se puede definir como el gradiente de voltaje que produce una caída de la corriente eléctrica a través del material. La resistencia dieléctrica se

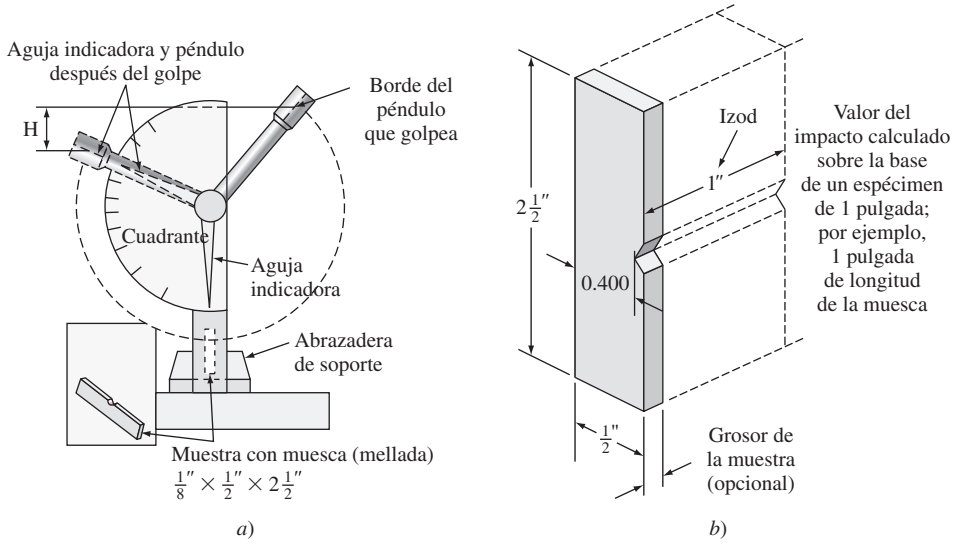


Figura 10.27
a) Prueba Izod de resistencia al impacto. *b*) Muestra empleada en el caso de materiales plásticos para realizar la prueba Izod de resistencia al impacto.
(Según W. E. Driver, "Plastics Chemistry and Technology", Van Nostrand Reinhold, 1979, p. 196-197.)

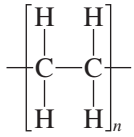
mide generalmente en voltios por milésimas de pulgada (mil) o voltios por milímetro. La resistencia dieléctrica de los materiales plásticos de la tabla 10.2 varía entre 385 y 1775 V/mil.

La temperatura máxima de uso de la mayoría de los materiales plásticos es relativamente baja y varía entre 130 a 300°F (54 a 149°C) para la mayoría de los materiales termoplásticos. Sin embargo, algunos termoplásticos tienen temperaturas máximas de uso más altas. Por ejemplo, el politetrafluoroetileno puede resistir temperaturas hasta de 550°F (288°C).

10.6.1 Polietileno

El *polietileno* (PE) es un material termoplástico translúcido, entre transparente y blancuzco, que se fabrica con frecuencia en películas delgadas transparentes. Las secciones gruesas son translúcidas y tienen una apariencia cerosa. Con el uso de colorantes se obtiene una amplia variedad de productos de distintos colores.

Unidad química estructural repetitiva



Polietileno
pf: 110-137°C
(230-278°F)

Tipos de polietileno En general, hay dos tipos de polietileno: de *baja densidad* (LDPE) y de *alta densidad* (HDPE). El de baja densidad tiene una estructura de ca-

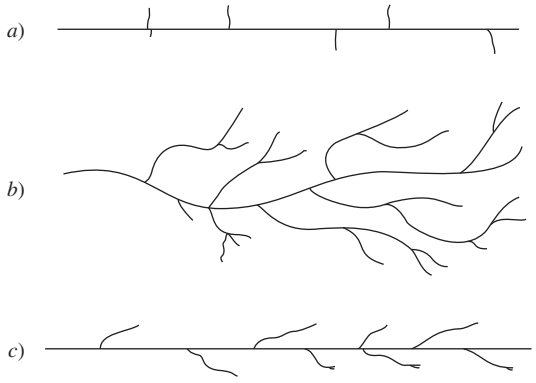


Figura 10.28
Estructura de cadena de diferentes tipos de polietileno: *a*) de alta densidad, *b*) de baja densidad y *c*) lineal de baja densidad.

dena ramificada (figura 10.28*b*), mientras que el de alta densidad tiene esencialmente una estructura de cadena lineal (figura 10.28*a*).

El polietileno de baja densidad se produjo primero comercialmente en el Reino Unido en 1939, usando reactores de autoclave (o tubulares) que requerían presiones superiores a 14 500 psi (100 MPa) y una temperatura de 300°C, aproximadamente. El polietileno de alta densidad fue producido comercialmente por vez primera mediante los procesos Phillips y Ziegler, usando catalizadores especiales, en 1956-1957. En estos procesos se redujeron considerablemente la presión y la temperatura requeridas por la reacción para convertir el etileno en polietileno. Por ejemplo, el proceso Phillips se lleva a cabo entre 100 y 150°C y a una presión de entre 290 y 580 psi (de 2 a 4 MPa).

Hacia 1976 se desarrolló un nuevo proceso simplificado de baja presión para producir polietileno, que requiere una presión entre 100 y 300 psi (de 0.7 a 2 MPa) y una temperatura de, aproximadamente, 100°C. El polietileno producido se describe como *polietileno lineal de baja densidad* (LLDPE) y tiene una estructura de cadena lineal con ramas laterales cortas inclinadas (figura 10.28*c*). En la sección 10.3 se describió un proceso para producir LLDPE (véase la figura 10.13).

Estructura y propiedades Las estructuras de cadena del polietileno de baja y alta densidad aparecen en la figura 10.28. El polietileno de baja densidad tiene una estructura de cadena ramificada que reduce su grado de cristalinidad y su densidad (tabla 10.2). La estructura de cadena ramificada disminuye también la resistencia del polietileno de baja densidad debido a que reduce las fuerzas de enlace intermoleculares. Por el contrario, el polietileno de alta densidad tiene muchas ramificaciones pequeñas en las cadenas principales y, por tanto, las cadenas se pueden empacar más estrechamente para incrementar la cristalinidad y la resistencia (tabla 10.3).

El polietileno es, por amplio margen, el material plástico más ampliamente usado. La principal razón de que ocupe esta primera posición es que su costo es bajo y tiene múltiples propiedades de importancia industrial, entre las que se incluyen su dureza a temperatura ambiente y a bajas temperaturas, con suficiente resistencia para

Tabla 10.3 Algunas propiedades de polietilenos de baja y de alta densidad

Propiedad	Polietileno de baja densidad	Polietileno lineal de baja densidad	Polietileno de alta densidad
Densidad (g/cm^3)	0.92-0.93	0.922-0.926	0.95-0.96
Resistencia a la tensión, ($\times$1 000 psi)	0.9-2.5	1.8-2.9	2.9-5.4
Elongación (%)	550-600	600-800	20-120
Cristalinidad (%)	65	···	95

Figura 10.29
Los trabajadores que instalan una película de polietileno de alta densidad como recubrimiento de un embalse se ven muy pequeños en comparación con éste. Cada hoja puede tener un área de medio acre y hasta 5 toneladas de peso.
(Cortesía de Schlegel Lining Technology, Inc.)

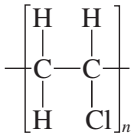
aplicaciones en muchos productos, su buena flexibilidad en un rango de temperaturas incluso menores a –73°C, su excelente resistencia a la corrosión, sus estupendas propiedades aislantes, su carácter inodoro e insípido y su baja transmisión agua-vapor.

Aplicaciones Las aplicaciones del polietileno incluyen recipientes, aislantes eléctricos, tubos hechos de productos químicos, enseres domésticos, y botellas moldeadas por soplado. Las películas de polietileno se usan para empacar y como materiales de revestimiento para estanques de agua (figura 10.29).

10.6.2 Policloruro de vinilo y copolímeros

El *policloruro de vinilo* (PVC) es un plástico sintético que se usa ampliamente y que tiene el segundo tonelaje de ventas más grande del mundo. El amplio uso del PVC se atribuye principalmente a su gran resistencia química y su capacidad única para mezclarse con aditivos y producir un gran número de compuestos con una amplia variedad de propiedades físicas y químicas.

Unidad estructural química que se repite



Cloruro de polivinilo
pf: ~204°C (~400°F)

Estructura y propiedades La presencia del átomo grande de cloro en uno de cada dos átomos de carbono de la cadena principal del policloruro de vinilo produce un material polimérico esencialmente amorfo que *no* recristaliza. Las grandes fuerzas de cohesión entre las cadenas del polímero del PVC se deben principalmente a los fuertes momentos bipolares generados por los átomos de cloro. Sin embargo, los grandes átomos de cloro negativos crean cierto obstáculo estérico y una repulsión electrostática, con lo cual se reduce la flexibilidad de las cadenas del polímero. Esta inmovilidad molecular da por resultado una dificultad en el procesado del homopolímero y solamente en unas cuantas aplicaciones se puede usar el PVC sin combinarlo con diversos aditivos para que pueda ser procesado y convertido en productos terminados.

El homopolímero de PVC tiene una resistencia a la tensión relativamente alta (7.5 a 9.5 ksi) y también a la fragilidad. El PVC tiene una temperatura media de deformación por calor (de 57 a 82°C [de 135 a 180°F] a 66 psi), buenas propiedades eléctricas (de 425 a 1 300 V/mil de resistencia dieléctrica) y alta resistencia a los disolventes. El alto contenido de cloro del PVC le da resistencia química y al fuego.

Elaboración de compuestos de cloruro de polivinilo El cloruro de polivinilo sólo se puede usar en unas cuantas aplicaciones sin que se tenga que añadir cierto número de compuestos al material básico para que pueda ser procesado y convertido en un producto terminado. Entre los compuestos que se añaden al PVC se incluyen plastificantes, estabilizadores térmicos, lubricantes, materiales de carga y pigmentos.

Los **plastificantes** imparten flexibilidad a los materiales poliméricos. Generalmente son compuestos de alto peso molecular que se seleccionan de modo que sean completamente miscibles y compatibles con el material básico. Con el PVC se usan comúnmente como plastificantes los ésteres de ftalato. El efecto de algunos plastificantes en la resistencia a la tensión del PVC se ilustra en la figura 10.30.

Se añaden *estabilizadores térmicos* al PVC para evitar la degradación térmica durante el procesado y porque ayudan también a prolongar la vida del producto terminado. Los estabilizadores típicos utilizados pueden ser totalmente orgánicos o inorgánicos, pero en general se trata de compuestos organometálicos que en esencia contienen estaño, plomo, cadmio-bario, calcio y zinc.

Los *lubricantes* ayudan a que la mezcla de los compuestos de PVC fluya durante el procesado y evitan la adhesión a las superficies metálicas. Por lo común se usan como lubricantes ceras, ésteres grasos y jabones metálicos.

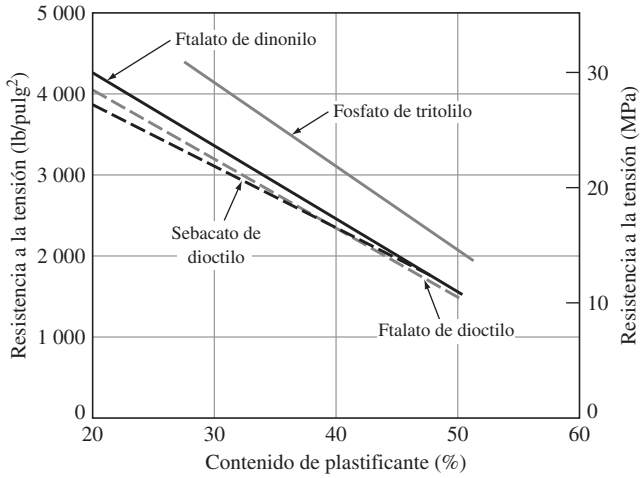


Figura 10.30
Efecto de diferentes plastificantes sobre la resistencia a la tensión del cloruro de polivinilo.
[Según C. A. Brighton, Vinyl Chloride Polymers (Compounding), en "Encyclopedia of Polymer Science and Technology", vol. 14, Wiley, 1971, p. 398.]

Rellenos tales como el carbonato de calcio se añaden principalmente para disminuir el costo de los compuestos de PVC.

Los *pigmentos*, tanto inorgánicos como orgánicos, se usan en los compuestos de PVC para darles color, opacidad y resistencia a la intemperie.

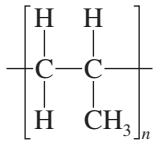
Policloruro de vinilo rígido El policloruro de vinilo por sí solo se puede usar en algunas aplicaciones pero es difícil de procesar y tiene baja resistencia al impacto. La adición de resinas ahuladas puede mejorar el flujo del polímero fundido durante el procesado, formando una dispersión de pequeñas partículas ahuladas suaves en la matriz del PVC rígido. El material ahulado sirve para absorber y dispersar energía de impacto, con lo cual la resistencia del material al impacto aumenta. Con propiedades mejoradas, el PVC rígido se usa en múltiples aplicaciones. En la industria de la construcción se usa el PVC rígido para tuberías, tinglados, marcos de ventana y canaletas, así como en molduras y adornos interiores. El PVC también se usa para hacer conductos de cables eléctricos.

Policloruro de vinilo plastificado La adición de plastificantes al PVC da por resultado suavidad, flexibilidad y extensibilidad. Estas propiedades se pueden modificar dentro de una amplia variedad, ajustando la relación polímero-plastificante. El policloruro de vinilo plastificado se usa en muchas aplicaciones en las que superan al caucho, los textiles y el papel. El PVC plastificado se usa en tapicería de muebles y automóviles, recubrimientos de paredes interiores, impermeables para lluvia, zapatos, equipaje y cortinas de baño. En la industria del transporte, el PVC plastificado se usa para hacer cubiertas protectoras de automóviles, aislamiento de cable eléctrico, tapetes y adornos interiores y exteriores. Otras aplicaciones son: mangueras de jardín, juntas para refrigerador, componentes de artefactos y enseres domésticos.

10.6.3 Polipropileno

El polipropileno es el tercer plástico más importante desde el punto de vista del tonelaje de ventas y es uno de los de menor costo ya que puede ser sintetizado a partir de materias primas petroquímicas de bajo costo usando un catalizador de tipo Ziegler.

Unidad estructural química que se repite



Polipropileno
pf: 165-177°C
(330-350°F)

Estructura y propiedades Al pasar del polietileno al polipropileno, la sustitución de un grupo metilo en cada segundo átomo de carbono de la cadena principal del polímero restringe la rotación de las cadenas, produciendo un material más resistente aunque menos flexible. Los grupos metilo de las cadenas también aumentan la temperatura de transición vítrea y, por esa razón, el polipropileno tiene mayores temperaturas de fusión y de deflexión térmica que el polietileno. Con el uso de catalizadores estereoespecíficos se puede sintetizar el polipropileno isotáctico con un punto de fusión del orden de 165 a 177°C (330 a 350°F). Este material se puede someter a temperaturas de unos 120°C (250°F) sin que sufra deformación.

El polipropileno está bien balanceado en cuanto a propiedades atractivas para producir gran número de artículos manufacturados. Entre éstas se incluyen su buena resistencia química a la humedad y al calor, además de que tiene baja densidad (0.900 a 0.910 g/cm^3), buena dureza superficial y estabilidad dimensional. El polipropileno tiene una notable flexibilidad como bisagra o articulación y se puede usar para productos que tienen integrada una bisagra. En combinación con el bajo costo de este monómero, el polipropileno es un material termoplástico muy competitivo.

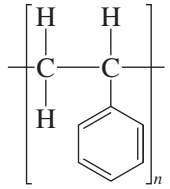
Aplicaciones Las principales aplicaciones del polipropileno son enseres domésticos, componentes de aparatos electrodomésticos, empaques, material de laboratorio y frascos de diversos tipos. En la industria del transporte, los copolímeros de polipropileno de alto impacto han reemplazado a los cauchos duros como cubiertas de acumuladores. Otras resinas similares se usan como recubrimientos de salpicaderas y protectores contra salpicaduras. El polipropileno mezclado con material de carga tiene aplicación en cubiertas de ventiladores de automóviles y ductos de calefacción, en los que se requiere una alta resistencia a la deflexión por calor. Además, el homopolímero del polipropileno se usa ampliamente como bajo alfombra, y como material tejido se usa en la fabricación de sacos para embarcar muchos productos industriales. En el mercado de películas, con el polipropileno en forma de película, se fabrican bolsas y envolturas para artículos blandos, debido a su lustre, brillo y buena resistencia. En empaques, el polipropileno se usa en tapas roscadas, cajas y recipientes.

10.6.4 Poliestireno

El poliestireno es el cuarto termoplástico de mayor tonelaje. El homopolímero de poliestireno es un material plástico incoloro inodoro e insípido que es relativamente frágil, a menos que sea modificado. Además del poliestireno tipo cristalino, otros tipos importantes del producto son los poliestirenos modificados con caucho, los resistentes

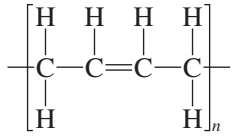
al impacto y los expandibles. El estireno se usa también para producir un gran número de copolímeros importantes.

Unidad estructural química repetitiva



Poliestireno
pf: 150-243°C
(330-470°F)

Estructura y propiedades La presencia del anillo fenileno en uno de cada dos átomos de carbono de la cadena principal del poliestireno produce una configuración voluminosa rígida con suficiente impedimento estérico para hacer que el polímero sea muy inflexible a temperatura ambiente. Se caracteriza por su rigidez, su claridad reluciente y su facilidad para ser procesado, pero tiende a ser frágil. Las propiedades del poliestireno ante el impacto pueden mejorar mediante la copolimerización con el elastómero de polibutadieno, el cual tiene la siguiente estructura química:



Polibutadieno

Los copolímeros de estireno de impacto tienen generalmente niveles de caucho entre 3 y 12 por ciento. La adición de caucho al poliestireno disminuye la rigidez y la temperatura de deflexión térmica del homopolímero.

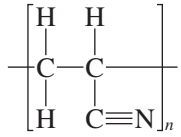
En general, los poliestirenos tienen buena estabilidad dimensional y poco encogimiento en el molde, y son fácilmente procesados a bajo costo. Sin embargo, tienen una resistencia pobre a la intemperie y son atacados químicamente por disolventes orgánicos y aceites. Los poliestirenos tienen buenas propiedades de aislamiento eléctrico y propiedades mecánicas adecuadas dentro de los límites de sus temperaturas de operación.

Aplicaciones Entre sus aplicaciones típicas figuran partes interiores de automóviles, carcasas de aparatos electrodomésticos, cuadrantes, perillas y enseres domésticos.

10.6.5 Poliacrilonitrilo

Este material polimérico de tipo acrílico se usa con frecuencia en forma de fibras, y debido a su resistencia y estabilidad química, se usa también como comonómero en algunos termoplásticos de ingeniería.

Unidad estructural química repetitiva



Poliacrilonitrilo
(no funde)

Estructura y propiedades La alta electronegatividad del grupo nitrilo en cada uno de los átomos de carbono de la cadena principal ejerce una repulsión eléctrica mutua,

provocando que las cadenas moleculares sean forzadas a formar estructuras extendidas, rígidas, parecidas a varillas. La regularidad de las estructuras de varilla les permite orientarse para producir fibras resistentes por medio de enlaces de hidrógeno entre las cadenas del polímero. Como resultado de ello, las fibras de acrilonitrilo tienen alta resistencia a la tensión y resisten bien a la humedad y a los disolventes.

Aplicaciones El acrilonitrilo se usa en forma de fibra en aplicaciones parecidas a las de la lana, como suéteres y cobertores. El acrilonitrilo se usa también como un comonómero para producir *copolímeros de estireno-acrilonitrilo* (resinas SAN) y *terpolímeros de acrilonitrilo-butadieno-estireno* (resinas ABS).

10.6.6 Estireno-acrilonitrilo (SAN)

Los termoplásticos de estireno acrilonitrilo son miembros de la familia del estireno que tienen alto rendimiento.

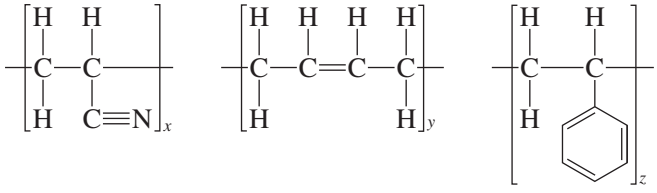
Estructura y propiedades Las resinas SAN son copolímeros aleatorios amorfos de estireno y acrilonitrilo. Esta copolimerización origina polaridad y fuerzas de atracción por el enlace de hidrógeno entre las cadenas del polímero. Como resultado, las resinas SAN tienen mejor resistencia química, temperaturas de deformación por calor más altas, mayor dureza y mejores características de capacidad de carga que el poliestireno solo. Los termoplásticos SAN son rígidos y duros, se procesan fácilmente y tienen el brillo y la transparencia del poliestireno.

Aplicaciones Las principales aplicaciones de las resinas SAN son en lentes de instrumentos automotrices, componentes del tablero de instrumentos y paneles de apoyo con carga de vidrio; perillas de aparatos electrodomésticos, y recipientes de licuadoras y batidoras; jeringas médicas y aspiradores sanguíneos; acabados vítreos de seguridad para construcciones y enseres domésticos como vasos y tazas.

10.6.7 ABS

ABS es el nombre que se da a una familia de termoplásticos. Las siglas se refieren a los tres monómeros utilizados para producir el ABS: *a*crilonitrilo, *b*utadieno y estireno. Los materiales ABS son importantes por sus propiedades para la ingeniería, como su buena resistencia mecánica y al impacto, combinadas con su facilidad de procesamiento.

Unidades estructurales químicas Las resinas ABS contienen las tres siguientes unidades de estructura química:



A: poliacrilonitrilo B: polibutadieno S: poliestireno

Estructura y propiedades de las resinas ABS La amplia variedad de propiedades útiles para la ingeniería exhibidas por las resinas ABS se debe a las propiedades que les aporta cada uno de sus componentes. El acrilonitrilo provee resistencia térmica y

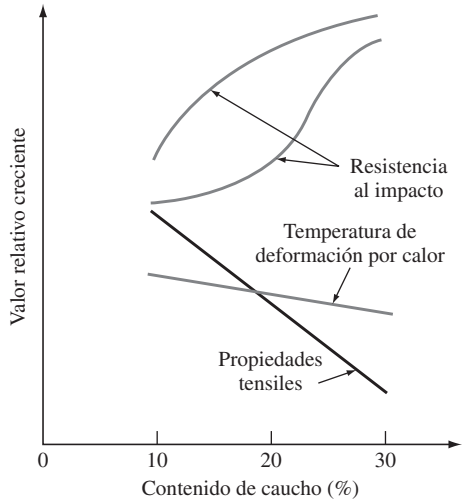


Figura 10.31
Porcentaje de caucho *versus* algunas propiedades de ABS.
(Según G. E. Teer, ABS y Related Multipolymers, en "Modern Plastics Encyclopedia", McGraw-Hill, 1981-1982.)

Tabla 10.4 Algunas propiedades típicas de los plásticos ABS (23°C)

	Impacto alto	Impacto medio	Impacto bajo
Resistencia al impacto (Izod):			
pie · lb/pulg	7-12	4-7	2-4
J/m	375-640	215-375	105-320
Resistencia a la tensión:			
×1 000 psi	4.8-6.0	6.0-7.0	6.0-7.5
MPa	33-41	41-48	41-52
Elongación (%)	15-70	10-50	5-30

química, y dureza; el butadieno proporciona resistencia al impacto; y el estireno imparte brillo superficial, rigidez y facilidad de procesado. La resistencia al impacto de los plásticos ABS se incrementa a medida que el porcentaje de contenido de caucho aumenta, pero las propiedades de resistencia a la tensión y las temperaturas de deformación ante el calor disminuyen (figura 10.31). En la tabla 10.4 se muestra la lista de algunas propiedades de los plásticos ABS de alto, de mediano y bajo impacto.

La estructura de las resinas ABS *no* es la de un terpolímero aleatorio. Las ABS se pueden considerar como la combinación de un copolímero brillante (estireno-acrilonitrilo) junto con la existencia de dominios de caucho (principalmente un polímero o copolímero de butadieno). La simple mezcla de caucho con el copolímero abrillantado no produce propiedades óptimas frente al impacto. La mejor resistencia al impacto se obtiene cuando la matriz del copolímero estireno-acrilonitrilo se injerta a los dominios del caucho para producir una estructura de dos fases (figura 10.32).

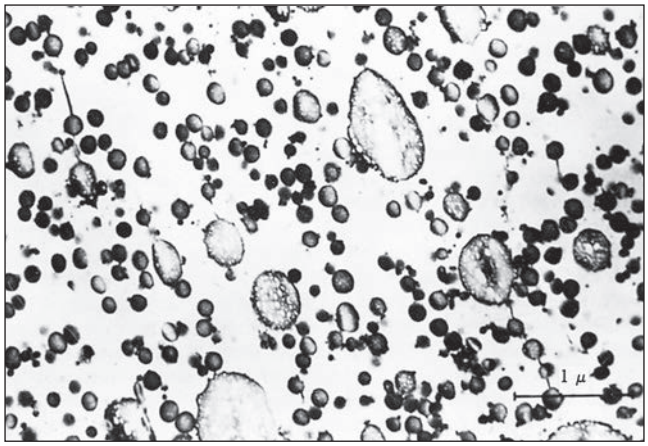


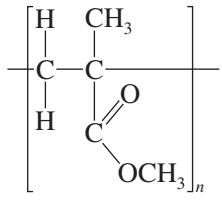
Figura 10.32
Micrografía electrónica de una sección ultradelgada de una resina ABS tipo G, que muestra las partículas ahuladas en un copolímero de estireno-acrilonitrilo.
[Según M. Matsuo, Polym. Eng. Sci., **9:***206(1969).]*

Aplicaciones El uso principal del ABS es en tuberías y accesorios, sobre todo de desagüe y ventilación para edificios. Otras aplicaciones del ABS son las partes automotrices, piezas de aparatos electrodomésticos como revestimientos para puertas e interiores de refrigerador, máquinas de oficina, cajas y cubiertas de computadora, carcasas de teléfono, portacables eléctricos y blindajes contra interferencias electromagnéticas de radiofrecuencias.

10.6.8 Polimetil metacrilato (PMMA)

El *polimetil metacrilato* (PMMA) es un termoplástico transparente duro y rígido que tiene una buena resistencia a la intemperie y es más resistente al impacto que el vidrio. Este material se conoce mejor con los nombres comerciales de Plexiglas o Lucite y es el material más importante del grupo de los termoplásticos conocidos como *acrílicos.*

Unidad estructural química que se repite



Polimetil metacrilato
pf: 160°C (320°F)

Estructura y propiedades La sustitución de los grupos metilo y metacrilato en cada uno de los átomos de carbono de la cadena de carbono principal proporciona un considerable impedimento estérico y, por tanto, hace que el PMMA sea rígido y relativamente fuerte. La configuración aleatoria de los átomos de carbono asimétricos produ-

ce una estructura completamente amorfa que tiene una alta transparencia a la luz visible. Los PMMA también tienen buena resistencia química al medio ambiente.

Aplicaciones Los PMMA se usan en ventanillas de aviones y barcos, tragaluces, alumbrado exterior y anuncios publicitarios. Otros usos incluyen cristales de luces traseras, escudos de seguridad, gafas protectoras, perillas y manijas.

10.6.9 Fluoroplásticos

Estos materiales son plásticos o polímeros hechos a partir de monómeros que contienen uno o varios átomos de flúor. Los fluoroplásticos poseen una combinación de propiedades especiales para aplicaciones de ingeniería. Se caracterizan por su alta resistencia a condiciones ambientales químicas hostiles y tienen notables propiedades como aislantes eléctricos. Los fluoroplásticos que contienen un gran porcentaje de flúor tienen bajos coeficientes de fricción, lo que les da propiedades de autolubricación y antiadherencia.

Se han producido muchos fluoroplásticos, pero los dos más ampliamente usados son el *politetrafluoroetileno* (PTFE) (figura 10.33) y el *policlorotrifluoroetileno* (PCTFE), que serán analizados en esta subsección.

Politetrafluoroetileno

Unidad estructural química que se repite

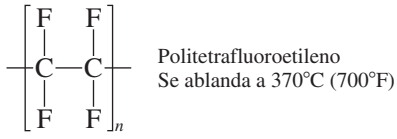


Figura 10.33
Estructura del politetrafluoroetileno.

Procesado químico El PTFE es un polímero totalmente fluorado que se forma por la polimerización en cadena de radicales libres del gas tetrafluoroetileno para producir polímeros de cadena lineal de unidades de —CF_2—. El descubrimiento original de la polimerización del gas tetrafluoroetileno para convertirse en politetrafluoroetileno (Teflón) fue hecho por R. J. Plunkett en 1938 en un laboratorio de Du Pont.

Estructura y propiedades El PTFE es un polímero cristalino con un punto de fusión cristalino de 327°C (620°F). El pequeño tamaño del átomo de flúor y la regularidad del polímero de cadena de carbono fluorado producen un material polimérico cristalino de alta densidad. La densidad del PTFE es alta para materiales plásticos y su valor es de 2.13 a 2.19 g/cm^3.

El PTFE tiene una resistencia excepcional a las sustancias químicas y es insoluble en todos los compuestos orgánicos, con excepción de unos cuantos disolventes fluorados. El PTFE tiene también propiedades mecánicas útiles cuando está a temperaturas criogénicas (–200°C [–330°F]) a 260°C (550°F). Su resistencia al impacto es alta, pero su resistencia a la tensión, al desgaste y a la fluencia son bajas si se comparan con otros plásticos utilizados en ingeniería. Pueden usarse cargas, como la fibra de

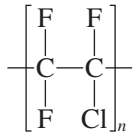
vidrio, para incrementar su resistencia. El PTFE es resbaloso y ceroso al tacto y tiene un bajo coeficiente de fricción.

Procesado Como los PTFE tienen una viscosidad tan alta en estado de fusión, los procesos de extrusión y moldeo por inyección convencionales no pueden usarse con ellos. Las piezas se moldean a temperatura ambiente, comprimiendo los gránulos a entre 2 000 y 10 000 psi (de 14 a 69 MPa). Después de la compresión, los materiales formados son sinterizados a una temperatura de 360 a 380°C (680 a 716°F).

Aplicaciones Los PTFE se usan en tuberías resistentes a sustancias químicas y partes de bombas, aislamiento de cables a alta temperatura, componentes eléctricos moldeados, cintas y recubrimientos antiadherentes. Los compuestos de PTFE con carga se usan para fabricar boquillas, empaques, juntas, sellos, rondanas y cojinetes.

Policlorotrifluoroetileno

Unidad estructural química que se repite



Policlorotrifluoroetileno
pf: 218°C (420°F)

Estructura y propiedades La sustitución de un átomo de cloro por cada cuarto átomo de flúor produce ciertas irregularidades en las cadenas de polímeros, de lo cual resulta un material menos cristalino y más moldeable. Por tanto, el PCTFE tiene un punto de fusión más bajo (218°C [420°F]) que el PTFE y puede ser extruido y moldeado con los procesos convencionales.

Aplicaciones Los productos extruidos, moldeados y maquinados de materiales poliméricos de PCTFE se usan en equipos de procesado químico y en aplicaciones eléctricas. Otras aplicaciones son: juntas, rondanas, sellos y componentes eléctricos.

10.7 TERMOPLÁSTICOS DE INGENIERÍA

En esta sección serán analizados algunos aspectos importantes de la estructura, propiedades y aplicaciones de los termoplásticos utilizados en ingeniería. La definición de un plástico de ingeniería es arbitraria puesto que virtualmente no hay un solo plástico que no pueda ser considerado en cierta forma como un plástico de ingeniería. En este texto se considerará como termoplástico de ingeniería el que tenga un balance de propiedades que lo hagan especialmente útil para aplicaciones de ingeniería. En esta exposición, las siguientes familias de termoplásticos han sido seleccionadas como termoplásticos de ingeniería: poliamidas (nailon), policarbonatos, resinas de fenileno basadas en óxido, acetales, poliésteres termoplásticos, polisulfona, sulfuro de polifenileno y polieterimida.

Los tonelajes de ventas de los termoplásticos de ingeniería representan un porcentaje relativamente pequeño si se comparan con el total de los plásticos de uso general. Una excepción pueden ser los nailon, debido a sus propiedades especiales. Sin embargo, no se dispone de cifras al respecto y por eso no se muestran. Las listas de precios a granel están disponibles.

Algunas propiedades básicas de los termoplásticos de ingeniería seleccionados En la tabla 10.5 se muestra una lista de densidades, resistencias a la tensión, resistencias

Tabla 10.5 Algunas propiedades de los termoplásticos de ingeniería seleccionados

Material	Densidad (g/cm^3)	Resistencia a la tensión (×1 000 psi)*	Resistencia al impacto, Izod (pie · lb/pulg)†	Resistencia dieléctrica (V/mil)‡	Temp. máx. de uso (sin carga) °F	°C
Nailon 6,6	1.13-1.15	9-12	2.0	385	180-300	82-150
Poliacetal, homo.	1.42	10	1.4	320	195	90
Policarbonato	1.2	9	12-16	380	250	120
Poliéster:						
PET	1.37	10.4	0.8	· · ·	175	80
PBT	1.31	8.0-8.2	1.2-1.3	590-700	250	120
Óxido de polifenileno	1.06-1.10	7.8-9.6	5.0	400-500	175-220	80-105
Polisulfona	1.24	10.2	1.2	425	300	150
Sulfuro de polifenileno	1.34	10	0.3	595	500	260

*1 000 psi = 6.9 MPa.
†Prueba Izod con muesca: 1 pie · lb/pulg = 53.38 J/m.
‡1 V/mil = 39.4 V/mm.

al impacto, resistencias dieléctricas y temperaturas de uso máximas para algunos termoplásticos de ingeniería que se han seleccionado. Las densidades de los termoplásticos de ingeniería que aparecen en la lista de la tabla 10.5 son relativamente bajas y varían de 1.06 a 1.42 g/cm^3. Las bajas densidades de estos materiales son una propiedad muy importante, lo que resulta en una ventaja en múltiples diseños de ingeniería. Igual que casi todos los materiales plásticos, sus resistencias a la tensión son relativamente bajas, como se muestra en la tabla 10.5, y varían de 8 000 a 12 000 psi (55 a 83 MPa). Estas bajas resistencias son, en general, una desventaja en los diseños de ingeniería. En cuanto a la resistencia al impacto de los termoplásticos de ingeniería, el policarbonato tiene una notable resistencia al impacto, que oscila entre valores de 12 a 16 pies · lb/pulg. Los valores bajos, de 1.4 a 2.0 pies · lb/pulg del poliacetal y el nailon 6,6 son engañosos en cierta forma puesto que estos materiales son plásticos "duros", sensibles a las melladuras, como lo demuestra la prueba Izod de impacto con muesca.

Las capacidades de los termoplásticos de ingeniería de aislamiento eléctrico de la tabla 10.5 son altas, como es el caso de la mayoría de los materiales plásticos, y varían entre 320 y 700 V/mil. Las temperaturas de uso máximas de los termoplásticos de ingeniería de la tabla 10.5 van de 180 a 500°F (82 a 260°C). De todos los termoplásticos de ingeniería que se muestran en la tabla 10.5, el sulfuro de polifenileno es el que tiene la temperatura de uso más alta, pues es de 500°F (260°C).

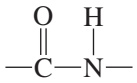
Muchas otras propiedades de los termoplásticos de ingeniería hacen que estos materiales sean importantes para la industria. Los termoplásticos de ingeniería son relativamente fáciles de procesar en forma casi terminada o terminada y su procesado puede ser automatizado en la mayoría de los casos. Los termoplásticos de ingeniería tienen buena resistencia a la corrosión en muchos ambientes. En algunos casos, los plásticos de ingeniería tienen muy buena resistencia al ataque de sustancias químicas. Por ejemplo, no hay disolventes que disuelvan el sulfuro de polifenileno por abajo de 400°F (204°C).

10.7.1 Poliamidas (nailon)

Las *poliamidas* o *nailon* son termoplásticos que se pueden procesar fundidos y cuya estructura de la cadena principal incluye un grupo amida en forma repetida. Los nailon son miembros de la familia de los plásticos de ingeniería y ofrecen una capacidad

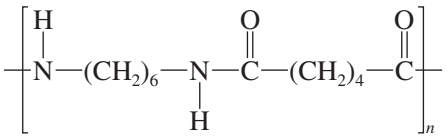
de carga superior a temperaturas elevadas, buena dureza, baja resistencia a la fricción y buena resistencia a las sustancias químicas.

Enlace químico que se repite Hay muchos tipos de nailon y la unidad que se repite es diferente en cada tipo. Sin embargo, todas ellas tienen en común el *enlace amida*:



Enlace amida

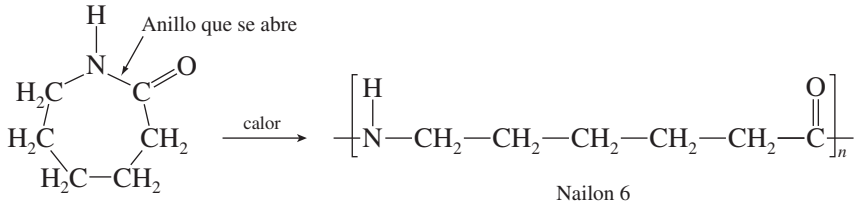
Proceso químico y reacciones de polimerización Algunos tipos de nailon son producidos por la polimerización sucesiva de un ácido orgánico dibásico con una diamina. El nailon 6,6,[4] que es el más importante de la familia de los nailon, se produce mediante una reacción de polimerización entre la hexametilendiamina y el ácido adípico para producir polihexametilendiamina (figura 10.10). La unidad estructural química que se repite en el nailon 6,6 es



Nailon 6,6
pf: 250-266°C
(482-510°F)

Otros nailon comerciales importantes producidos con el mismo tipo de reacción son 6,9, 6,10 y 6,12, formados por hexametilendiamina y ácidos acelaico (9 carbonos), sebásico (10 carbonos) o duodecanedioico (12 carbonos), respectivamente.

Los nailon se pueden producir también por polimerización en cadena de compuestos cíclicos que contienen tanto ácido orgánico como grupos amina. Por ejemplo, el nailon 6 se puede polimerizar a partir de ϵ-caprolactama (6 carbonos) como se muestra en el siguiente diagrama:



ϵ-caprolactama

Nailon 6
pf: 216-225°C (420-435°F)

Estructura y propiedades Los nailon son materiales poliméricos altamente cristalinos a causa de la estructura simétrica regular de sus cadenas poliméricas principales. La alta tendencia a cristalizar de los nailon se evidencia por el hecho de que, en condiciones de solidificación controladas, se pueden producir esferulitas. En la figura 10.34 se muestra un ejemplo excelente de la formación de una estructura compleja con esferulitas en el crecimiento del nailon 9,6 a 210°C.

La alta resistencia de los nailon se debe, en parte, al enlace de hidrógeno que se forma entre las cadenas moleculares (figura 10.35). El enlace amida hace posible un tipo de enlace de hidrógeno NHO entre las cadenas. Como resultado de esto, las po-

[4] La designación "6,6" del nailon 6,6 se refiere a que hay 6 átomos de carbono en la diamina reaccionante (hexametilendiamina) y también 6 átomos de carbono en el ácido orgánico reaccionante (ácido adípico).

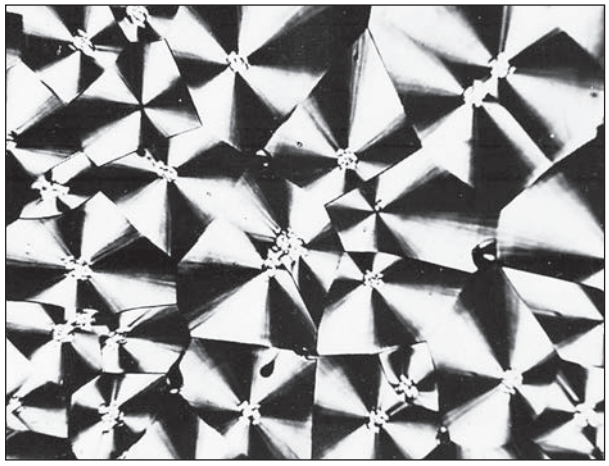


Figura 10.34
Estructura compleja del nailon 9,6 con esferulitas, desarrollada a 210°C. El hecho de que las esferulitas puedan aumentar de tamaño en este material de nailon pone de manifiesto la capacidad de los materiales de nailon para cristalizar.
(Cortesía de J. H. Magill, Universidad de Pittsburgh.)

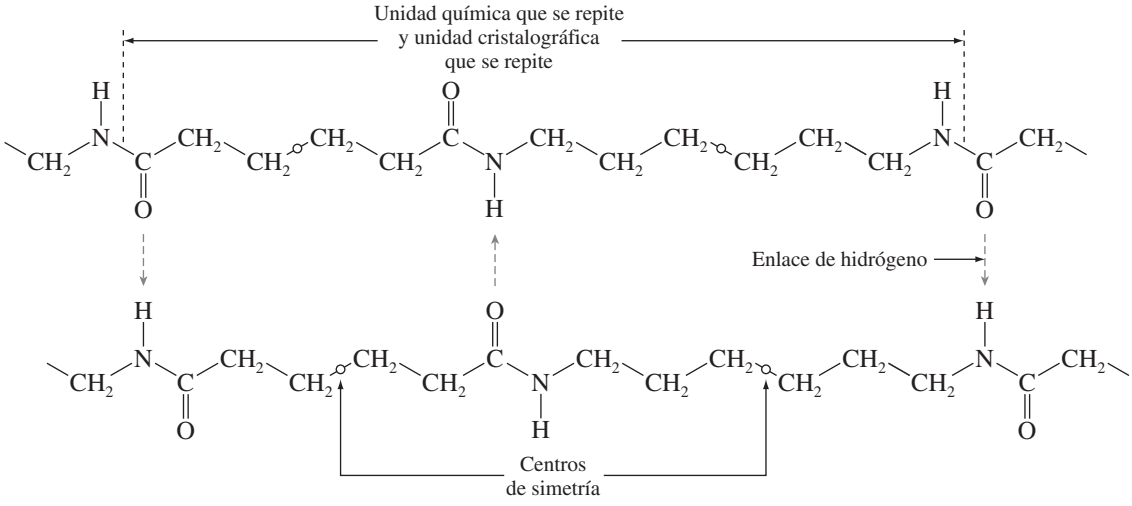


Figura 10.35
Representación esquemática del enlace de hidrógeno entre dos cadenas moleculares.
[Según M. I. Kohan (ed.), "Nylon Plastics", Wiley, 1973, p. 274.]

liamidas de nailon tienen alta resistencia, altas temperaturas de deformación por calor y buena resistencia a las sustancias químicas. La flexibilidad de las principales cadenas de carbono imparte flexibilidad molecular, lo cual origina una baja viscosidad del fundido y facilidad de procesado. La flexibilidad de las cadenas de carbono contribuye a su alta lubricidad, baja fricción superficial y buena resistencia a la abrasión.

Sin embargo, la polaridad y los enlaces de hidrógeno de los grupos amida originan una alta absorción de agua, lo cual da como resultado cambios dimensionales con un aumento del contenido de humedad. Los nailon 11 y 12, con sus cadenas de carbono más largas entre los grupos amida, son menos sensibles a la absorción de agua.

Procesamiento La mayoría de los nailon son procesados mediante métodos convencionales de moldeo por inyección o extrusión.

Aplicaciones Las aplicaciones de los nailon se hacen en casi todas las industrias. Entre los usos comunes están la fabricación de piezas antifricción, engranajes y cojinetes que no requieren lubricación, piezas mecánicas que deben funcionar a altas temperaturas y ser resistentes a hidrocarburos y disolventes, partes eléctricas sometidas a altas temperaturas y partes de alto impacto que requieren resistencia y rigidez. Las aplicaciones automotrices incluyen velocímetros y engranajes para limpiadores de parabrisas y abrazaderas de ajuste. El nailon reforzado con vidrio se usa en paletas de ventilador de motor, recipientes para el fluido de frenos y de servodirección, tapas de válvulas y cubiertas de la columna de dirección. Las aplicaciones eléctricas y/o electrónicas incluyen conectores, enchufes, aislantes de alambre para conexiones, monturas de antena y terminales. El nailon se usa también en empaques y para aplicaciones de uso general.

Los nailon 6,6 y 6 constituyen la mayor parte del tonelaje de ventas de nailon en Estados Unidos porque ofrecen la combinación más favorable de precio, propiedades y procesado. Sin embargo, los nailon 6,10 y 6,12 y los nailon 11 y 12 y otros más, se producen y se venden a muy buen precio cuando se requieren sus propiedades especiales.

10.7.2 Policarbonato

Los policarbonatos son otra clase de termoplásticos de ingeniería, ya que algunas de sus características especiales de alto desempeño, como la alta resistencia, dureza y estabilidad dimensional se requieren en algunos diseños de ingeniería. Las resinas de policarbonato son fabricadas en Estados Unidos por General Electric bajo el nombre comercial Lexan, y por Mobay con el nombre comercial Merlon.

Unidad estructural química básica que se repite

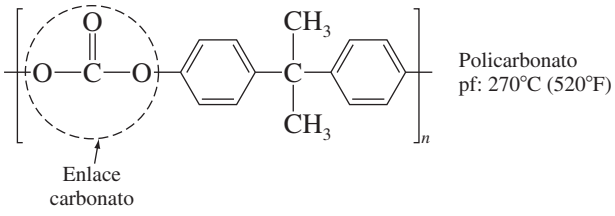


Figura 10.36
Estructura del termoplástico de policarbonato.

Estructura y propiedades Los dos grupos fenilo y los dos grupos metilo, unidos al mismo átomo de carbono en la unidad estructural que se repite (figura 10.36), producen un considerable impedimento estérico y forman una estructura molecular muy rígida. Sin embargo, los enlaces sencillos carbono-oxígeno del enlace carbonato proporcionan cierta flexibilidad molecular a la estructura molecular general, lo que da

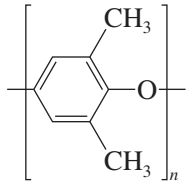
por resultado energía de alto impacto. La resistencia a la tensión de los policarbonatos a temperatura ambiente es relativamente alta, de unos 9 ksi (62 MPa), y sus resistencias al impacto son muy altas a 12 a 16 pies · lb/pulg (640 a 854 J/m) según se midió en la prueba Izod. Otras propiedades importantes de los policarbonatos para los diseños de ingeniería son sus altas temperaturas de deformación por calor, sus buenas propiedades como aislantes eléctricos y su transparencia. La resistencia a la fluencia de estos materiales también es apreciada. Los policarbonatos son resistentes a diversas sustancias químicas, pero son atacados por los disolventes. Su alta estabilidad dimensional hace posible que se usen en componentes de ingeniería de precisión en los que existen estrictos márgenes de tolerancia.

Aplicaciones Las aplicaciones típicas de los policarbonatos incluyen escudos protectores, levas y engranajes, cascos, cubiertas de relés eléctricos, componentes de aviones, hélices de barcos, cajas y lentes de semáforos, vidrieras para ventanas y colectores solares, carcasas de herramientas eléctricas manuales, aparatos domésticos pequeños y terminales de computadora.

10.7.3 Resinas de fenileno a base de óxido

Las resinas de fenileno a base de óxido constituyen un tipo de materiales termoplásticos de ingeniería.

Unidad estructural química básica que se repite



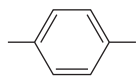
Óxido de polifenileno

Procesamiento químico Un proceso patentado para el acoplamiento oxidativo de monómeros fenólicos se utiliza para producir las resinas termoplásticas de fenileno a base de óxido que tienen el nombre comercial Noryl (General Electric).

Estructura y propiedades Los anillos de fenileno que se repiten[5] generan impedimento estérico para la rotación de la molécula del polímero y una atracción electrónica, debido a los electrones en resonancia de los anillos de benceno de las moléculas adyacentes. Esos factores dan lugar a un material polimérico con alta rigidez, resistencia, resistencia a sustancias químicas en muchos ambientes, estabilidad dimensional y temperatura de deformación por calor.

Hay muchas calidades diferentes de estos materiales para satisfacer los requerimientos de una amplia variedad de aplicaciones en el diseño de ingeniería. Entre las principales ventajas de diseño de las resinas de polifenileno a base de óxido pueden citarse excelentes propiedades mecánicas en un rango de temperatura que va de –40 a

[5] Un anillo de fenileno es un anillo bencénico enlazado químicamente a otros átomos como, por ejemplo,



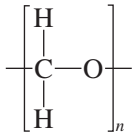
150°C (–40 a 300°F), excelente estabilidad dimensional con baja fluencia, módulos altos, baja absorción de agua, buenas propiedades dieléctricas, magníficas propiedades al impacto y estupenda resistencia a los ambientes químicos acuosos.

Aplicaciones Las aplicaciones típicas de las resinas de óxido de polifenileno son conectores eléctricos, sintonizadores de TV y componentes del balancín para determinar la deformación por calor, aparatos electrodomésticos pequeños y carcasas de máquinas de oficina, así como tableros de automóvil, rejillas y partes exteriores de la carrocería.

10.7.4 Acetales

Los *acetales* son un tipo de materiales termoplásticos que se usan en ingeniería y tienen un alto rendimiento. Se cuentan entre los termoplásticos más resistentes (resistencia a la tensión de 10 ksi [68.9 MPa] y rígidos (módulos de flexibilidad de 410 ksi [2 820 MPa]) y tienen excelente resistencia a largo plazo y estabilidad dimensional. Otras características importantes son sus bajos coeficientes de fricción, buen procesamiento, buena resistencia a disolventes y una alta resistencia térmica de 90°C (195°F), aproximadamente, sin carga.

Unidad estructural química que se repite



Polioximetileno
pf: 175°C (347°F)

Tipos de acetales Actualmente existen dos tipos básicos de acetales: un homopolímero (Delrin de Du Pont) y un copolímero (Celcon de Celanese).

Estructura y propiedades La regularidad, simetría y flexibilidad de las moléculas del polímero acetal producen un material polimérico con altas características de regularidad, resistencia y temperatura de deformación por calor. Los acetales tienen excelentes propiedades para soportar carga a largo plazo y estabilidad dimensional, por lo cual se pueden usar en partes de precisión, como engranajes, cojinetes y levas. El homopolímero es más duro y rígido, y tiene más resistencia a la tensión y resistencia a la flexión que el copolímero. El copolímero es más estable para aplicaciones de alta temperatura a largo plazo y tiene un mayor alargamiento.

La baja absorción de humedad del homopolímero de acetal no modificado le da buena estabilidad dimensional. Además, las características de bajo desgaste y fricción del acetal lo hacen útil para partes en movimiento. En todas las partes en movimiento, una propiedad importante del acetal es su excelente resistencia a la fatiga. Sin embargo, los acetales son inflamables y, por tanto, su uso en aplicaciones eléctricas y/o electrónicas es limitado.

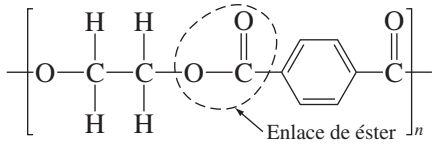
Aplicaciones Los acetales han reemplazado a muchas piezas fundidas de zinc, bronce y aluminio, y a las estampadoras de acero, gracias a su bajo costo. En múltiples aplicaciones, en los casos en que no se requiere la alta resistencia de los metales, los costos de operación de acabado y montaje se pueden reducir o eliminar usando acetales.

En los automóviles, los acetales se usan como componentes en sistemas de combustible, cinturones de seguridad y manijas de ventanas. Las aplicaciones de los acetales en maquinaria incluyen acoplamientos metálicos, propulsores de bombas, engranajes, levas y carcasas. Los acetales se usan también en una amplia variedad de productos de consumo, como cierres de cremallera, carretes para pescar y plumas para escribir.

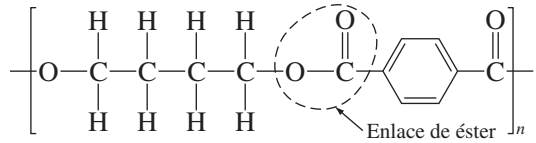
10.7.5 Poliésteres termoplásticos

Tereftalato de polibutileno y tereftalato de polietileno Dos importantes poliésteres termoplásticos de ingeniería son el *tereftalato de polibutileno* (PBT) y el *tereftalato de polietileno* (PET). Éste se usa ampliamente en películas para envoltura de alimentos y como fibra para ropa, alfombras y cuerdas. Desde 1977, el PET se ha usado como resina para contenedores. El PBT, que tiene en sus cadenas del polímero una unidad que se repite de mayor peso molecular, fue introducido en 1969 como material de reemplazo en algunas aplicaciones donde se usaban plásticos termoestables y metales. El uso del PBT continúa en expansión debido a sus propiedades y a su costo relativamente bajo.

Unidades estructurales químicas que se repiten



Tereftalato de polietileno



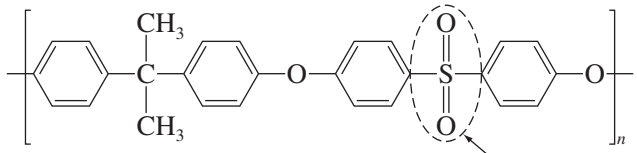
Tereftalato de polibutileno

Estructura y propiedades Los anillos de fenileno, junto con los grupos carbonilo (C═O) del PBT forman unidades largas, planas y voluminosas en las cadenas del polímero. Esta estructura regular cristaliza con bastante rapidez a pesar de su voluminosidad. La estructura de anillo del fenileno le imparte rigidez a este material y las unidades de butileno proporcionan cierta movilidad molecular para el procesado del fundido. El PBT tiene buena resistencia (7.5 ksi [52 MPa] para grados no reforzados y 19 ksi [131 MPa] para grados reforzados con vidrio a 40 por ciento). Las resinas termoplásticas de poliéster también tienen características de baja absorción de humedad. La estructura cristalina del PBT lo hace resistente a la mayoría de las sustancias químicas. En su mayoría, los compuestos orgánicos tienen poco efecto sobre el PBT a temperaturas moderadas. El PBT tiene también buenas propiedades como aislante eléctrico, ya que es casi independiente de la temperatura y la humedad.

Aplicaciones Entre las aplicaciones eléctricas y electrónicas del PBT están los conectores, interruptores, relés, componentes de sintonizadores de TV, componentes de alto voltaje, tableros de terminales, tableros de circuito integrado, soportes para escobillas del motor y carcasas. Los usos industriales del PBT incluyen propulsores de bombas, carcasas y ménsulas de apoyo, válvulas y soportes de riego, además de cámaras y componentes de medidores de agua. El PBT se usa también en carcasas y mangos de aparatos electrodomésticos. Sus aplicaciones automotrices incluyen componentes grandes de carrocerías, tapas y rotores de encendido de alta energía, tapas de bobinas de encendido, carretes de bobina, controles de inyección de combustible, marcos y engranajes de velocímetro.

Polisulfona

Unidad estructural química que se repite



Polisulfona pf: 315°C (600°F)

Estructura y propiedades Los anillos de fenileno de la unidad de polisulfona que se repite, restringen la rotación de las cadenas del polímero y crean una fuerte atracción intermolecular, lo cual imparte alta resistencia y rigidez a este material. Un átomo de oxígeno en posición para[6] del anillo de fenileno con respecto al grupo sulfona proporciona la estabilidad de alta oxidación de los polímeros de sulfona. Los átomos de oxígeno entre los anillos de fenileno (enlace éter) aportan a la cadena flexibilidad y resistencia al impacto.

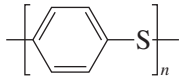
Las propiedades de las polisulfonas que tienen especial importancia para el diseño de ingeniería son su alta temperatura de deformación por calor, de 174°C (345°F) a 245 psi (1.68 MPa), y el que pueden ser usados por un tiempo prolongado a 150 a 174°C (300 a 345°F). Las polisulfonas tienen alta resistencia a la tensión (para termoplásticos), de 10.2 ksi (70 MPa), y una tendencia relativamente baja a la fluencia. Las polisulfonas resisten la hidrólisis en medios acuosos ácidos y alcalinos porque los enlaces de oxígeno que se encuentran entre los anillos de fenileno son hidrolíticamente estables.

Aplicaciones Algunas aplicaciones eléctricas y electrónicas son: conectores, carretes y núcleos de bobina, componentes de televisores, película de capacitores y tableros de circuitos estructurales. La resistencia de las polisulfonas a la esterilización en autoclave es la causa de su amplio uso en bandejas e instrumental médico. En procesos químicos y equipo de control de contaminación, las polisulfonas se usan en tuberías, bombas, empaques de torre, módulos y placas de apoyo de filtro resistentes a la corrosión.

10.7.6 Sulfuro de polifenileno

El *sulfuro de polifenileno* (PPS) es un termoplástico de ingeniería que se caracteriza por su notable resistencia química, además de sus buenas propiedades mecánicas y de rigidez a temperaturas elevadas. El PPS se produjo por vez primera en 1973 y es fabricado por Phillips Chemical Co., bajo el nombre comercial Ryton.

Unidad estructural química que se repite El sulfuro de polifenileno tiene una unidad estructural que se repite en su cadena principal de anillos para bencénicos sustituidos y átomos de azufre divalente:

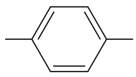


Sulfuro de polifenileno
pf: 288°C (550°F)

Estructura y propiedades La estructura simétrica compacta de los anillos de fenileno separados por átomos de azufre produce un material polimérico rígido y fuerte. La estructura molecular compacta promueve también un alto grado de cristalinidad. Debido a la presencia de los átomos de azufre, el PPS es altamente resistente al ataque de sustancias químicas. De hecho, no se ha encontrado una sustancia que disuelva al PPS con facilidad a menos de 200°C (392°F). Incluso a altas temperaturas, son pocos los materiales que reaccionan químicamente con el PPS.

El PPS sin carga tiene una resistencia de 9.5 ksi (65 MPa) a temperatura ambiente, pero si posee una carga de vidrio de 40 por ciento, su resistencia se eleva a 17 ksi (120

[6] Las posiciones para son los extremos opuestos del anillo de benceno.



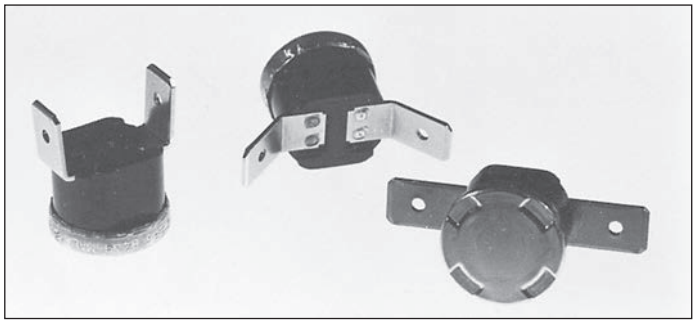


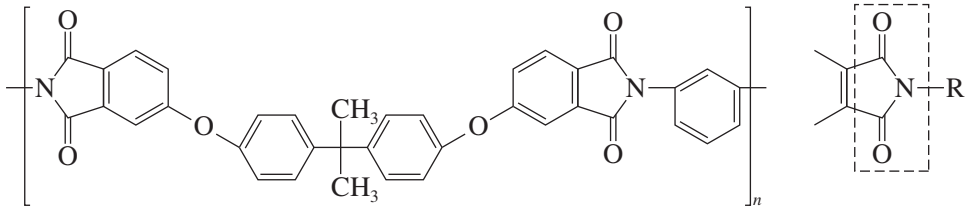
Figura 10.37
Termostatos internos fijos hechos parcialmente de sulfuro de polifenileno (la parte negra del artefacto). El PPS proporciona buena resistencia eléctrica, alta resistencia térmica y baja contracción durante el moldeo.
(Cortesía de Texas Instruments.)

MPa). Debido a su estructura cristalina, la pérdida de resistencia con el aumento de temperatura es gradual, e incluso a 200°C (392°F) conserva una resistencia considerable.

Aplicaciones Las aplicaciones mecánico-industriales incluyen equipo para procesamiento químico, como bombas sumergibles centrífugas, aletas y bombas tipo engranaje. Los compuestos de PPS se recomiendan específicamente para múltiples aplicaciones automotrices "bajo el capó", como los sistemas para el control de emisiones, porque son impermeables a los efectos corrosivos de los gases de escape del motor, la gasolina y otros fluidos automotrices. Las aplicaciones eléctricas y electrónicas incluyen componentes de computadora, como conectores, formas para bobina y carretes. En la figura 10.37 se muestran algunos termostatos interiores fijos que aprovechan las propiedades aislantes y de resistencia al calor del PPS. Los recubrimientos de PPS, resistentes a la corrosión y térmicamente estables, se usan en ductos para crudo, válvulas, accesorios acopladores y otros equipos que se usan en las industrias de procesamiento químico y del petróleo.

10.7.7 Polieterimida

La polieterimida es uno de los más recientes termoplásticos amorfos de ingeniería de alto desempeño. Fue presentado en 1982 y lo ofrece comercialmente General Electric Co., bajo la marca Ultem. La polieterimida tiene la siguiente estructura química:



Polieterimida Enlace imida

La estabilidad de los enlaces imida le dan a este material alta resistencia térmica, resistencia a la fluencia y alta rigidez. El enlace éter que se encuentra entre los anillos

Tabla 10.6 Algunas aleaciones comerciales de polímeros

Aleación de polímero	Nombre comercial del material	Proveedor
ABS/policarbonato	Bayblend MC2500	Mobay
ABS/cloruro de polivinilo	Cycovin K-29	Borg-Warner Chemicals
Acetal/elastómero	Celcon C-400	Celanese
Policarbonato/polietileno	Lexan EM	General Electric
Policarbonato/PBT/elastómero	Xenoy 1000	General Electric
PBT/PET	Valox 815	General Electric

Fuente: *Modern Plastics Encyclopedia, 1984-85,* McGraw-Hill.

de fenilo proporciona el grado necesario de flexibilidad de cadena para tener buenas características de procesado al fundir y de flujo. Este material tiene buenas propiedades de aislamiento eléctrico que son estables en un amplio rango de temperaturas y frecuencias. Entre los usos de la polieterimida se incluyen aplicaciones eléctricas y electrónicas, automotrices, aeroespaciales y de especialidad. Las aplicaciones eléctricas y electrónicas incluyen cajas de interruptores de circuitos de alto voltaje, conexiones a espigas de contacto, carretes y bobinas para altas temperaturas y bloques de fusibles. Los tableros de circuitos impresos hechos de polieterimida reforzada ofrecen estabilidad dimensional para condiciones de soldadura en fase de vapor.

10.7.8 Aleaciones de polímeros

Las aleaciones de polímeros son mezclas de homopolímeros o copolímeros estructuralmente diferentes. En las aleaciones termoplásticas de polímero, diferentes tipos de cadenas moleculares del polímero están unidas entre sí por fuerzas bipolares intermoleculares secundarias. Por el contrario, en un copolímero dos monómeros estructuralmente diferentes están enlazados juntos en una cadena molecular por medio de enlaces covalentes fuertes. Los componentes de una aleación de polímero deben tener cierto grado de compatibilidad o adhesión para evitar la separación de fases durante el procesamiento. Las aleaciones de polímeros se han vuelto más importantes en la actualidad porque con ellos se pueden crear materiales plásticos con propiedades específicas y es posible optimizar el costo y el desempeño.

Algunas de las primeras aleaciones de polímeros fueron creadas agregando polímeros ahulados, como el ABS, a polímeros rígidos como el policloruro de vinilo. Los materiales ahulados mejoran la dureza del material rígido. Actualmente, hasta los termoplásticos más novedosos están formados por aleaciones. Por ejemplo, el tereftalato de polibutileno está aleado con un tereftalato de polietileno para mejorar el brillo superficial y reducir el costo. En la tabla 10.6 se da una lista de algunas aleaciones de polímeros comerciales.

10.8 PLÁSTICOS NO DEFORMABLES POR CALOR (TERMOFIJOS)

Los plásticos no deformables por calor o termofijos están formados por una estructura molecular reticular de enlaces covalentes primarios. Algunos termofijos están enlazados en forma entrecruzada por medio de calor o por una combinación de calor y presión. Otros pueden estar entrecruzados mediante una reacción química que se lleva a cabo a temperatura ambiente (termofijos producidos en frío). Aunque las piezas curadas hechas con termofijos se pueden suavizar por medio de calor, sus enlaces cruza-

dos enlazados covalentemente impiden que puedan ser restaurados al estado de fluidez que tenían antes que la resina plástica fuera curada. Los termofijos, por tanto, no pueden ser recalentados y fundidos de nuevo como los termoplásticos. Ésta es una desventaja de los termofijos, ya que las rebabas producidas durante el procesado no pueden ser recicladas y utilizadas de nuevo.

En general, las ventajas de los plásticos termofijos para aplicaciones en diseño de ingeniería son una o varias de las siguientes:

1. Alta estabilidad térmica
2. Alta rigidez
3. Alta estabilidad dimensional
4. Resistencia a la fluencia y a la deformación bajo carga
5. Peso ligero
6. Propiedades aislantes eléctricas y térmicas altas

Los plásticos termofijos se procesan generalmente por medio de compresión o moldeo con transferencia. Sin embargo, en algunos casos se han desarrollado técnicas de moldeo por inyección de termofijos de modo que el costo del procesado ha disminuido.

Muchos termofijos se usan en forma de compuestos moldeados que constan de dos ingredientes principales: 1) una resina que contiene agentes de curado, endurecedores y plastificantes y 2) cargas y/o materiales de refuerzo que pueden ser orgánicos o inorgánicos. El aserrín de madera, la mica y la celulosa se usan comúnmente como materiales de carga.

En seguida se presentan las listas de precios a granel en Estados Unidos, y algunas de las propiedades importantes de ciertos materiales termofijos seleccionados en grupo con propósitos comparativos.

Precios de lista a granel de algunos plásticos termofijos Los precios de lista a granel de los termofijos de uso común se encuentran en el rango de bajo a medio entre los plásticos y varían de $0.55 a $1.26 (precios de 2000). De todos los termofijos de la lista, los fenólicos son los de menor precio y los de mayor tonelaje de ventas. Los poliésteres insaturados también tienen un precio relativamente bajo y su tonelaje de ventas es relativamente alto. Las resinas epóxicas, que tienen propiedades especiales para múltiples aplicaciones industriales, tienen altos precios.

Algunas propiedades básicas de los plásticos termofijos seleccionados En la tabla 10.7 se ofrece una lista de las densidades, resistencias a la tensión, resistencias al impacto, resistencias dieléctricas y temperaturas de uso máximas de algunos plásticos termofijos seleccionados. Las densidades de los plásticos termofijos tienden a ser ligeramente mayores que en la mayoría de los materiales plásticos, como los que se mencionan en la tabla 10.7, que varían de 1.34 a 2.3 g/cm^3. La resistencia a la tensión de la mayoría de los termofijos es relativamente baja y se encuentra casi siempre dentro de un rango de 4 000 a 15 000 psi (28 a 103 MPa). Sin embargo, con una gran cantidad de carga de vidrio, la resistencia a la tensión de algunos termofijos puede incrementarse hasta 30 000 psi (207 MPa). Los termofijos con carga de vidrio también tienen más alta resistencia al impacto, como se indica en la tabla 10.7. Los termofijos tienen también buena resistencia dieléctrica, que varía de 140 a 650 V/mil. Sin embargo, igual que en todos los materiales plásticos, la temperatura de uso máxima es limi-

Tabla 10.7 Algunas propiedades de los plásticos termofijos seleccionados

Material	Densidad (g/cm^3)	Resistencia a la tensión (×1 000 psi)*	Resistencia al impacto, Izod (pie · lb/pulg)†	Resistencia dieléctrica (V/mil)‡	Temp. máx. de uso (sin carga) °F	Temp. máx. de uso (sin carga) °C
Fenólico:						
Carga de aserrín de madera	1.34-1.45	5-9	0.2-0.6	260-400	300-350	150-177
Carga de mica	1.65-1.92	5.5-7	0.3-0.4	350-400	250-300	120-150
Carga de vidrio	1.69-1.95	5-18	0.3-18	140-400	350-550	177-288
Poliéster:						
Carga de vidrio SMC	1.7-2.1	8-20	8-22	320-400	300-350	150-177
Carga de vidrio BMC	1.7-2.3	4-10	15-16	300-420	300-350	150-177
Melamina:						
Carga de celulosa	1.45-1.52	5-9	0.2-0.4	350-400	250	120
Carga de borra	1.50-1.55	7-9	0.4-0.5	300-330	250	120
Carga de vidrio	1.8-2.0	5-10	0.6-18	170-300	300-400	150-200
Urea, cargada de celulosa	1.47-1.52	5.5-13	0.2-0.4	300-400	170	77
alquídica:						
Carga de vidrio	2.12-2.15	4-9.5	0.6-10	350-450	450	230
Carga de mineral	1.60-2.30	3-9	0.3-0.5	350-450	300-450	150-230
Epóxica (bis A):						
Sin carga	1.06-1.40	4-13	0.2-10	400-650	250-500	120-260
Carga de mineral	1.6-2.0	5-15	0.3-0.4	300-400	300-500	150-260
Carga de vidrio	1.7-2.0	10-30	···	300-400	300-500	150-260

*1 000 psi = 6.9 MPa.
†Prueba Izod con muesca a: 1 pie · lb/pulg = 53.38 J/m.
‡1 V/mil = 39.4 V/mm.
Fuente: *Materials Engineering*, mayo de 1972.

tada. La temperatura de uso máxima de los termofijos que aparecen en la lista de la tabla 10.7 varía entre 170 y 550°F (de 77 a 288°C).

Ahora se examinarán algunos aspectos importantes de la estructura, propiedades y aplicaciones de los siguientes termofijos: fenólicos, resinas epóxicas, poliésteres insaturados y resinas amínicas.

10.8.1 Fenólicos

Los materiales termofijos fenólicos fueron los primeros materiales plásticos importantes utilizados en la industria. Las patentes originales de la reacción de fenol con formaldehído para producir el plástico fenólico baquelita fueron concedidas a L. H. Baekeland en 1909. Los plásticos fenólicos se usan todavía en la actualidad debido a su bajo costo y a que tienen buenas propiedades eléctricas y son aislantes térmicos, además de que cuentan con buenas propiedades mecánicas. Se moldean con facilidad pero tienen límites en cuanto a color (generalmente son negros o castaños).

Química Las resinas fenólicas son producidas comúnmente mediante la reacción del fenol y el formaldehído por polimerización por condensación, con agua como subproducto. Sin embargo, se puede usar casi cualquier reactivo de fenol o aldehído. Es común que se produzcan resinas fenólicas de dos pasos (novolac) porque son convenientes para el moldeo. En el primer paso se produce una resina termoplástica brillante que se puede fundir, pero no puede formar un sólido reticular entrecruzado. Este material se prepara haciendo reaccionar menos de un mol de formaldehído con un mol de fe-

nol en presencia de un catalizador ácido. La reacción de polimerización se muestra en la figura 10.11.

La adición de *hexametilentetramina* (hexa), un catalizador básico, en el primer paso de la resina fenólica, hace posible producir enlaces cruzados de metileno para formar un material termofijo. Cuando se aplica calor y presión a la resina novolac que contiene hexa, los hexa se descomponen y producen amoniaco, el cual proporciona los enlaces cruzados de metileno para formar una estructura con enlaces cruzados.

La temperatura requerida para los enlaces cruzados (curado) de la resina novolac varía de 120 a 177°C (250 a 350°F). Los compuestos por moldeo se hacen combinando la resina con diversas cargas, que a veces pueden llegar hasta a 50 a 80 por ciento del peso total de los compuestos de moldeo. Las cargas reducen la contracción durante el moldeo, tienen menor costo y mejoran la resistencia. También se pueden usar para aumentar las propiedades eléctricas y como aislamiento térmico.

Estructura y propiedades El gran número de enlaces cruzados de la estructura aromática (figura 10.38) produce alta dureza, rigidez y resistencia, combinadas con buenas propiedades de aislamiento térmico y eléctrico, y resistencia química.

Algunos de los diversos tipos de compuestos fenólicos que se fabrican por moldeo son:

1. *Compuestos de uso general.* Estos materiales generalmente están cargados con aserrín de madera para aumentar la resistencia al impacto y disminuir el costo.

2. *Compuestos de alta resistencia al impacto.* Estos compuestos están cargados con celulosa (borra de algodón y pedacería de tela), minerales y fibras de vidrio, para lograr resistencias al impacto hasta de 18 pies · lb/pulg (961 J/m).

3. *Compuestos de alto aislamiento eléctrico.* Estos materiales están cargados con minerales (p. ej., mica) para aumentar su resistencia eléctrica.

4. *Compuestos resistentes al calor.* Éstos están cargados con minerales (p. ej., asbestos) y pueden soportar exposición prolongada al calor, a temperaturas de 150 a 180°C (300 a 350°F).

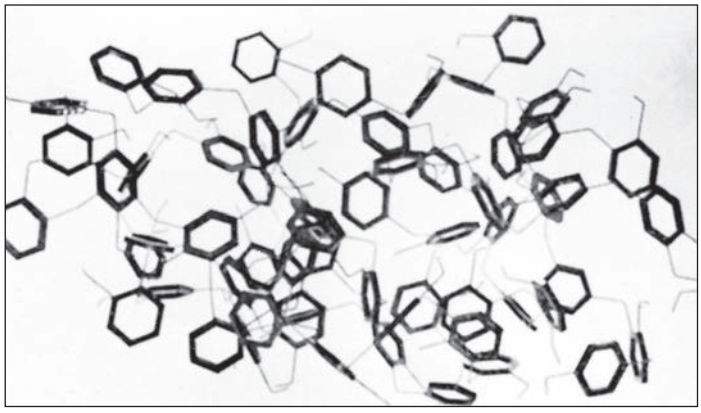


Figura 10.38
Modelo tridimensional de una resina fenólica polimerizada.
(Según E. G. K. Pritchett en "Encyclopedia of Polymer Science and Technology", vol. 10, Wiley, 1969, p. 30.)

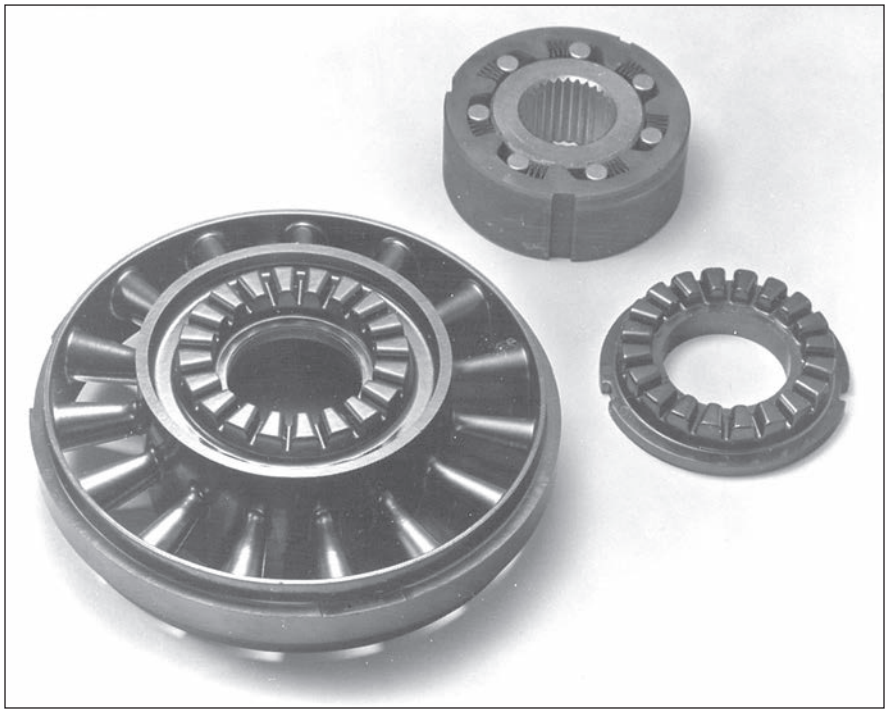


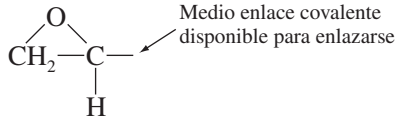
Figura 10.39
Las tres partes que se muestran corresponden a material fenólico reforzado con vidrio y son las partes de las piezas de transmisión de un automóvil 1985. La pieza fenólica reemplazará al que anteriormente se hacía de metal.
(Cortesía de Rogers Corp.)

Aplicaciones Los compuestos fenólicos se usan ampliamente en dispositivos de cableado, conmutadores eléctricos, conectores y sistemas de relés telefónicos. La ingeniería automotriz usa compuestos moldeados fenólicos para fabricar componentes de frenos de potencia y partes de la transmisión (figura 10.39). Los fenólicos se usan ampliamente en manijas, perillas y placas terminales de aparatos electrodomésticos pequeños. Debido a que son buenos adhesivos a altas temperaturas y resistentes a la humedad, las resinas fenólicas se usan para laminar ciertos tipos de contrachapado y en tableros de partículas. También se usan grandes cantidades de resinas fenólicas como material aglutinante de arena en fundiciones y para moldeo en cascarón.

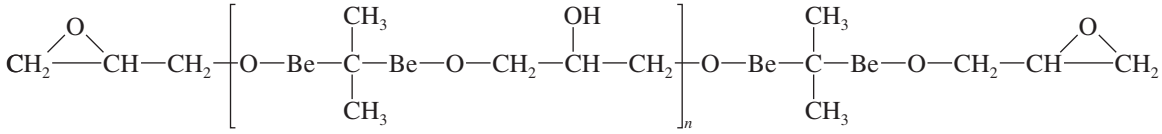
10.8.2 Resinas epóxicas

Las resinas epóxicas son una familia de materiales poliméricos termofijos que no generan productos de reacción cuando son endurecidos (enlace cruzado) y, por tanto, tienen baja contracción al curar. También tienen buena adhesión a otros materiales, buena resistencia química y al medio ambiente, buenas propiedades mecánicas y buenas propiedades como aislantes eléctricos.

Química Las resinas epóxicas se caracterizan por tener dos o más grupos epóxicos por molécula. La estructura química de un grupo epóxido es



La mayoría de las resinas epóxicas comerciales tienen la siguiente estructura química general:



donde Be = anillo de benceno. Para líquidos, la *n* de la estructura suele ser menor que 1. Para resinas sólidas, *n* es 2 o mayor. También hay muchos otros tipos de resinas epóxicas que tienen estructuras diferentes de la que aquí se muestra.

Para formar materiales termoestables sólidos, las resinas epóxicas deben ser endurecidas usando agentes que formen enlaces cruzados y/o catalizadores para desarrollar las propiedades deseadas. Los grupos epóxicos e hidroxílicos (—OH) son los lugares adecuados para que en la reacción se formen enlaces cruzados. Los agentes que dan lugar a enlaces cruzados incluyen aminas, anhídridos y productos de condensación de aldehídos.

Para el curado a temperatura ambiente, cuando los requerimientos de calor para los materiales epóxicos sólidos son bajos (menos de 100°C, aproximadamente), como agentes de curado se usan aminas, como la dietilentriamina y la trietilentetramina. Algunas resinas epóxicas se enlazan en forma cruzada usando un reactivo de curado, mientras que otras pueden reaccionar con sus propios sitios reactivos si se encuentra presente un catalizador apropiado. En una reacción epóxica, el anillo epóxido se abre y un donador de hidrógeno, por ejemplo un grupo amino o hidroxilo, se enlaza con el átomo de oxígeno del grupo epóxido. En la figura 10.40 se muestra la reacción de los grupos epóxidos en los extremos de dos moléculas epóxicas lineales con etilendiamina.

En la reacción de la figura 10.40, los anillos epóxidos se rompen y los átomos de hidrógeno que provienen de la diamina forman grupos —OH, que son los sitios reactivos para formar futuros entrecruzamientos. Una característica importante de esta reacción es que no se producen subproductos. Se pueden usar muchos tipos diferentes de aminas para producir resinas epóxicas con enlace cruzado.

Estructura y propiedades El bajo peso molecular de las resinas epóxicas no curadas en estado líquido les imparte una movilidad molecular excepcionalmente alta durante el procesado. Esta propiedad permite que la resina epóxica líquida cubra rápida y totalmente superficies húmedas. Esta acción humectante es importante para las epóxicas que se usan en materiales reforzados y adhesivos. Además, la posibilidad de ser vaciadas en su forma final es importante para el impregnado y el encapsulado. La alta reactividad de los grupos epóxicos con agentes para curar, como las aminas, proporciona un alto grado de enlaces cruzados y da por resultado buena dureza y resistencia mecánica y a sustancias químicas. Como no se produce ningún subproducto durante la reacción de curado, se encoge poco al endurecerse.

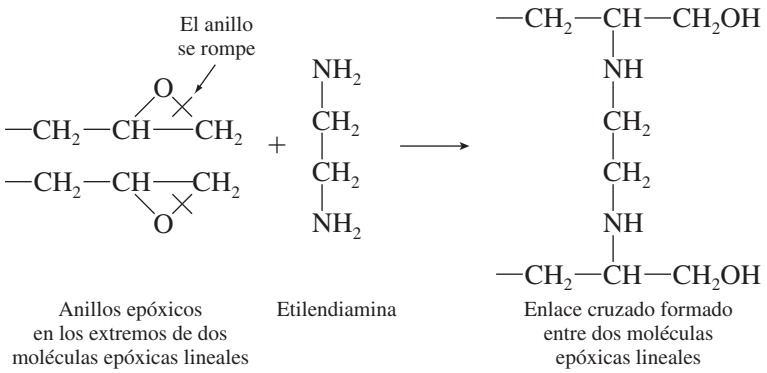


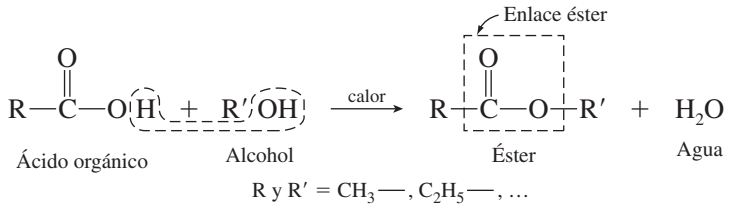
Figura 10.40
Reacción de los anillos epóxicos en los extremos de dos moléculas epóxicas lineales con etilendiamina para formar un enlace cruzado. Obsérvese que no se forma ningún subproducto.

Aplicaciones Las resinas epóxicas se usan en una amplia variedad de recubrimientos protectores y decorativos en virtud de su buena adhesión y su buena resistencia mecánica y química. Se usan principalmente en revestimientos de latas y tambores, recubrimientos para pintura de automóviles y artefactos, y recubrimientos de cables. En la industria eléctrica y electrónica, las resinas epóxicas se usan debido a su resistencia dieléctrica, baja contracción durante el curado, buena adhesión y la capacidad de conservar sus propiedades bajo diversas condiciones ambientales, como sitios mojados y con alta humedad. Las aplicaciones típicas incluyen aislantes de alto voltaje, conmutadores y encapsulado de transistores. Las resinas epóxicas se usan también para fabricar laminados y materiales de matriz de fibra reforzada. Las resinas epóxicas son el material matriz predominante en la mayoría de los componentes de alto desempeño, como los fabricados con fibras de módulos altos (p. ej., grafito).

10.8.3 Poliésteres insaturados

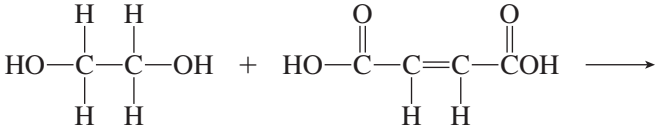
Los poliésteres insaturados tienen dobles enlaces covalentes carbono-carbono reactivos que pueden entrecruzarse para formar materiales termofijos. En combinación con fibras de vidrio, los poliésteres insaturados pueden entrecruzarse, formando materiales compuestos reforzados de alta resistencia.

Química El enlace éster se puede producir cuando un alcohol reacciona con un ácido orgánico, como

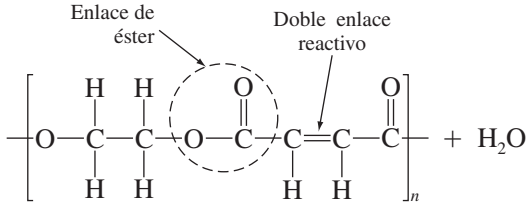


La resina poliéster insaturada básica se puede formar por la reacción de un diol (un alcohol con dos grupos —OH) con un diácido (un ácido con dos grupos —COOH) que contiene doble enlace carbono-carbono reactivo. Las resinas comerciales pueden

tener mezclas de diferentes dioles y diácidos para lograr que tengan propiedades especiales; por ejemplo, el etilenglicol puede reaccionar con ácido maleico para formar un poliéster lineal:

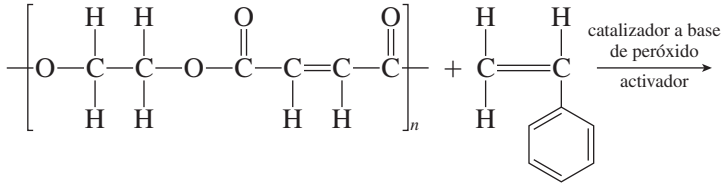


Etilenglicol (alcohol) — Ácido maleico (ácido orgánico)

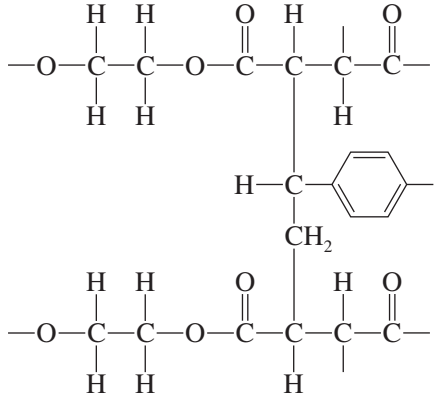


Poliéster lineal

Los poliésteres insaturados lineales generalmente están enlazados en forma cruzada con moléculas tipo vinilo, como el estireno, en presencia de un agente de curado por radicales libres. Los agentes de curado a base de peróxido son los que se usan comúnmente, con peróxido de *metil etil cetona* (MEK) y, en general, se emplean para el curado de los poliésteres a temperatura ambiente. Casi siempre la reacción se activa con una pequeña cantidad de naftalato de cobalto.



Poliéster lineal — Estireno



Poliéster de enlace cruzado

Estructura y propiedades Las resinas de poliéster insaturadas son materiales de baja viscosidad que se pueden mezclar con grandes cantidades de cargas y refuerzos. Por ejemplo, los poliésteres insaturados pueden contener hasta, aproximadamente, 80 por ciento en peso de refuerzos de fibra de vidrio. Cuando los poliésteres insaturados reforzados con fibra de vidrio se endurecen, tienen una resistencia notable, 25 a 50 ksi (172 a 344 MPa), y muestran buena resistencia al impacto y a las sustancias químicas.

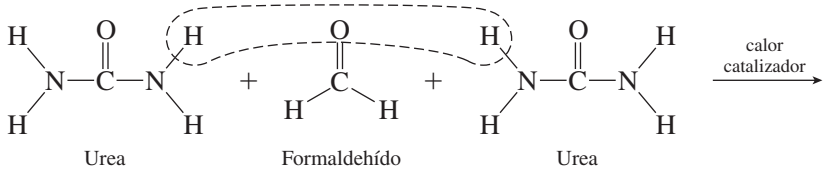
Procesado Las resinas de poliéster insaturado se pueden procesar por diversos métodos, pero en la mayoría de los casos son moldeadas de la misma manera. Las técnicas de aspersión a molde abierto o de nebulización a pistola se usan para muchas piezas de pequeño volumen. Para partes de gran volumen, como paneles de automóvil, generalmente se usa el moldeo por compresión. En años recientes se han producido *compuestos de moldeo en lámina* (SMC) que combinan resina, refuerzo y otros aditivos para acelerar la alimentación del material en prensas de moldeo hechas con troqueles de metal acoplados.

Aplicaciones Los poliésteres insaturados reforzados con vidrio se usan para fabricar paneles de automóviles y autopartes. Este material se usa también para pequeñas plataformas de barcos y en la industria de la construcción, para fabricar paneles y componentes de baños. Los poliésteres insaturados reforzados se usan también en tuberías, tanques y ductos donde se requiere buena resistencia a la corrosión.

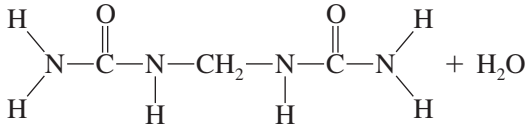
10.8.4 Resinas amínicas (ureas y melaminas)

Las resinas amínicas son materiales poliméricos termofijos formados por la reacción controlada de formaldehído con diversos compuestos que contienen el grupo amina —NH_2. Los dos tipos de resinas amínicas más importantes son la urea-formaldehído y la melamina-formaldehído.

Química Tanto la urea como la melamina reaccionan con el formaldehído mediante reacciones de polimerización por condensación que producen agua como subproducto. La reacción de condensación de urea con formaldehído es



Urea + Formaldehído + Urea

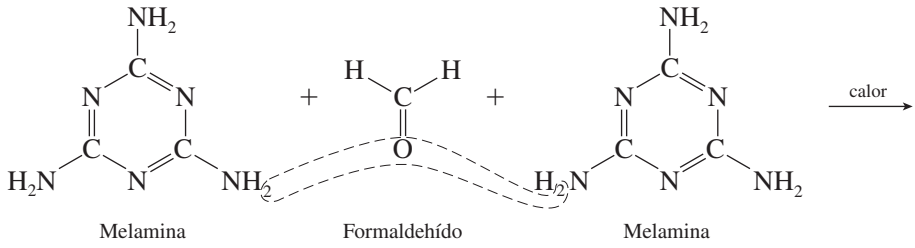


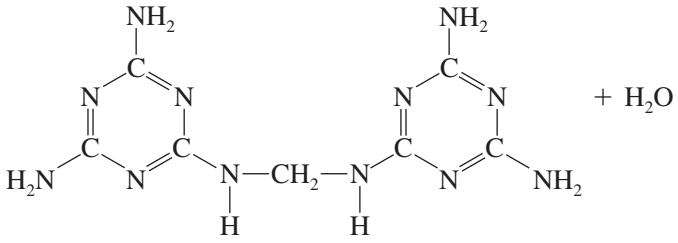
Molécula de urea-formaldehído

Los grupos amino que están en los extremos de la molécula aparecen aquí reaccionando con más moléculas de formaldehído para producir una estructura polimérica reticular sumamente rígida. Como en el caso de las resinas fenólicas, al principio la urea y el

formaldehído sólo son parcialmente polimerizados para producir un polímero de bajo peso molecular que se muele para pulverizarlo y luego mezclarlo con cargas, pigmentos y un catalizador. Entonces, el compuesto moldeado puede ser moldeado por compresión hasta darle su forma final mediante la aplicación de calor (de 127 a 171°C [de 260 a 340°F]) y presión (2 a 8 ksi [14 a 55 MPa]).

La melamina reacciona también con el formaldehído por medio de una reacción de condensación, dando por resultado moléculas polimerizadas de melamina-formaldehído y desprendiendo agua como subproducto:[7]





Estructura y propiedades La alta reactividad de los polímeros de bajo peso molecular de urea-formaldehído y melamina-formaldehído hace posible la producción de productos termofijos con alto grado de enlaces cruzados. Cuando estas resinas se combinan con cargas de celulosa (aserrín de madera), se obtienen productos de bajo costo que tienen buena rigidez, resistencia a la tensión y resistencia al impacto. Los de urea-formaldehído cuestan menos que los de melamina-formaldehído, pero no tienen tan alta resistencia al calor ni tanta dureza superficial como la melamina.

Aplicaciones Los compuestos moldeables de urea-formaldehído con carga de celulosa se usan para hacer placas y receptáculos eléctricos de pared, y en perillas y manijas. Las aplicaciones de los compuestos de melamina cargados con celulosa incluyen vajillas, botones, perillas y botones de control moldeados. Tanto las resinas de urea como las de melamina solubles en agua encuentran aplicación como adhesivos y resinas de enlace para tableros de partículas de madera, contrachapado, cascos de barco, pisos y ensamblado de mobiliario. Las resinas amínicas también se usan en aglutinantes para núcleos y cajas de fundición.

[7] Solamente un átomo de hidrógeno es removido de cada grupo NH_2 y un átomo de oxígeno de una molécula de formaldehído, para formar la molécula de H_2O.

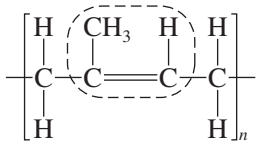
10.9 ELASTÓMEROS (CAUCHOS)

Los **elastómeros**, o cauchos, son materiales poliméricos cuyas dimensiones pueden cambiar en gran medida cuando se someten a esfuerzos y cuando retornan a sus dimensiones originales (o casi) al cesar la fuerza deformante. Hay muchos tipos de materiales elastoméricos, pero aquí solamente se tratarán los siguientes: caucho natural, poliisopreno sintético, caucho de estireno-butadieno, cauchos de nitrilo, policloropreno y siliconas.

10.9.1 Caucho natural

Producción El caucho natural se produce comercialmente a partir del látex del árbol *Hevea brasiliensis*, que se cultiva en plantaciones, especialmente en las regiones tropicales del sudeste asiático, sobre todo en Malasia e Indonesia. La fuente del caucho natural es un líquido lechoso conocido como *látex*, el cual es una suspensión que contiene partículas muy pequeñas de caucho. El látex líquido se recolecta de los árboles y se lleva a un centro de procesamiento, donde el látex en bruto se diluye hasta alcanzar 15 por ciento de contenido de caucho y luego se coagula con ácido fórmico (un ácido orgánico). El material coagulado se comprime entonces a través de rodillos para eliminar el agua y producir un material en forma de lámina. Las láminas se secan, ya sea mediante corrientes de aire caliente o por el calor de humos de hogueras (hojas ahumadas de caucho). Las hojas laminadas y otros tipos de caucho crudo generalmente son procesados entre pesados rodillos, en los cuales la acción del esfuerzo mecánico rompe algunas de las cadenas largas del polímero y reduce su peso molecular promedio. La producción de caucho natural representó casi 30 por ciento del mercado mundial de caucho en 1980.

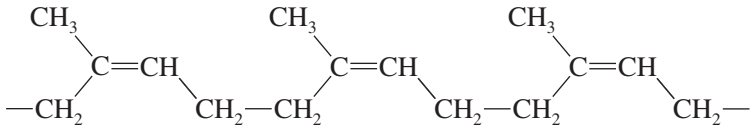
Estructura El caucho natural es principalmente ***cis*-1,4 poliisopreno** mezclado con pequeñas cantidades de proteínas, lípidos, sales inorgánicas y gran número de otros compuestos. El *cis*-1,4 poliisopreno es un polímero de cadena larga (peso molecular promedio de, aproximadamente, 5×10^5 g/mol) y tiene la siguiente fórmula estructural:



cis-1,4 poliisopreno
Unidad estructural que se repite para el caucho natural

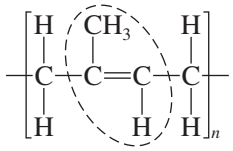
El prefijo *cis*- indica que el grupo metilo de un átomo de hidrógeno está del mismo lado del enlace doble carbono-carbono, como muestra el círculo de guiones en torno a la fórmula. El 1,4 indica que las unidades químicas que se repiten en la cadena polimérica están enlazadas en forma covalente en el primer y el cuarto átomos de carbono. Las cadenas del polímero de caucho natural son largas, están enredadas y enrolladas, y a temperatura ambiente se encuentran en un estado de agitación continua. La curvatura y enrollamiento de las cadenas poliméricas de caucho natural se atribuyen al impedimento estérico del grupo metilo y al átomo de hidrógeno que está del mismo lado del enlace doble carbono-carbono. La distribución de los enlaces

covalentes en la cadena de polímero de caucho natural se muestra esquemáticamente a continuación:



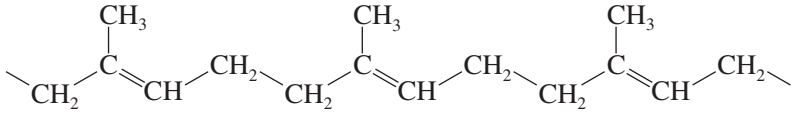
Segmento de una cadena polimérica de caucho natural

Hay otro isómero[8] estructural del poliisopreno, el ***trans*-1,4 poliisopreno**,[9] llamado *gutapercha*, la cual no es un elastómero. En esta estructura, el grupo metilo y el átomo de hidrógeno enlazados covalentemente al doble enlace carbono-carbono se encuentran en los lados opuestos al doble enlace de la unidad repetitiva, como lo indica el círculo punteado en el siguiente diagrama:



trans-1,4 poliisopreno
Unidad estructural que se repite en la gutapercha

En esta estructura el grupo metilo y el átomo de hidrógeno enlazados al enlace doble no interfieren entre sí y, como resultado, la molécula de *trans*-1,4 poliisopreno es más simétrica y puede cristalizar dando lugar a un material rígido.



Segmento de la cadena del polímero de gutapercha

Vulcanización (curado) La **vulcanización** es el proceso químico por medio del cual las moléculas del polímero se unen mediante enlaces entrecruzados, formando moléculas más largas que restringen el movimiento molecular. En 1839 Charles Goodyear[10] descubrió un proceso de vulcanización para el caucho, usando azufre y un carbonato de plomo básico. Goodyear encontró que cuando una mezcla de caucho natural, azufre y carbonato de plomo se calientan, el caucho deja de ser termoplástico y se convierte en un material elastomérico. Aunque todavía en la actualidad la reacción del azufre con el caucho es compleja y no se ha comprendido del todo, el resultado final es que algunos de los dobles enlaces de las moléculas de poliisopreno se rompen y forman enlaces entrecruzados de átomos de azufre, como se muestra en la figura 10.41.

---

[8] Los isómeros estructurales son moléculas que tienen la misma fórmula molecular pero diferente distribución estructural de sus átomos.

[9] El prefijo *trans*- proviene del latín y significa "a través".

[10] Charles Goodyear (1800-1860). Inventor estadounidense que descubrió el proceso de vulcanización del caucho natural usando azufre y carbonato de plomo como reactivos químicos. La patente estadounidense 3633 fue otorgada a Charles Goodyear el 15 de junio de 1844, para un "Mejoramiento de India-Rubber Fabrics".

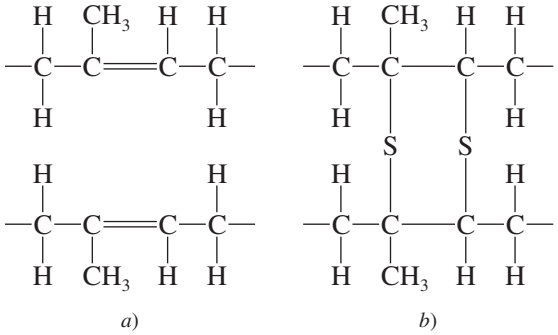


Figura 10.41
Ilustración esquemática de la vulcanización del caucho. En este proceso, los átomos de azufre forman enlaces entrecruzados entre las cadenas del 1,4 poliisopreno. *a*) Cadena de *cis*-1,4 poliisopreno antes que se forme el enlace cruzado de azufre. *b*) Cadena de *cis*-1,4 poliisopreno después que se forman los enlaces entrecruzados con azufre en los lugares activos de enlace doble.

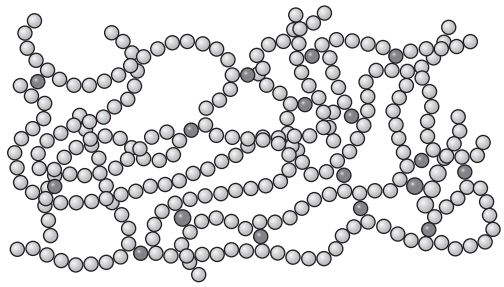


Figura 10.42
Modelo de las cadenas de enlace entrecruzado del *cis*-1,4 poliisopreno por átomos de azufre (sombreado más oscuro). *(Según W. G. Moffatt, G. W. Pearsall y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. I, Wiley, 1965, p. 109.)*

En la figura 10.42 se muestra esquemáticamente cómo los átomos de azufre, al formar enlaces cruzados, imparten rigidez a las moléculas de caucho, y en la figura 10.43 se muestra cómo se incrementa la resistencia a la tensión del caucho natural por medio de la vulcanización. Debido a que el caucho y el azufre reaccionan muy lentamente, incluso a temperaturas elevadas, para acortar el tiempo de curado a temperaturas elevadas se mezclan generalmente sustancias químicas aceleradoras con el caucho, junto con otros aditivos como cargas, plastificantes y antioxidantes.

De ordinario, los cauchos blandos endurecidos contienen cerca de 3 por ciento en peso de azufre y para su vulcanización o fraguado se calientan en un rango de 100 a 200°C. Si se incrementa el contenido de azufre, los enlaces entrecruzados se incrementarán también, produciendo un material más duro y menos flexible. Se puede producir una estructura totalmente rígida de caucho duro con 45 por ciento de azufre, aproximadamente.

El oxígeno o el ozono reaccionan también con los enlaces dobles del carbono de las moléculas del caucho, en forma similar a la reacción de vulcanización de azufre, y provocan que el caucho se vuelva frágil. Esta reacción de oxidación puede ser retardada hasta cierto punto añadiendo antioxidantes cuando se prepara el caucho.

El uso de cargas puede reducir el costo del producto del caucho y también reforzar el material. El negro de humo se usa comúnmente como carga para el caucho y, en general, mientras más fino sea el tamaño de la partícula del negro de humo, más alta será la resistencia a la tensión. El negro de humo aumenta también la resistencia del caucho a la rasgadura y la abrasión. Las arenas silíceas (por ejemplo, silicato de calcio) y las arcillas alteradas químicamente, se usan también como cargas para reforzar el caucho.

Propiedades En la tabla 10.8 se comparan propiedades de resistencia a la tensión, alargamiento y densidad del caucho natural endurecido con las de otros elastómeros sintéticos. Obsérvese que, como es lógico suponer, la resistencia a la tensión de estos materiales es relativamente baja y su alargamiento es extremadamente alto.

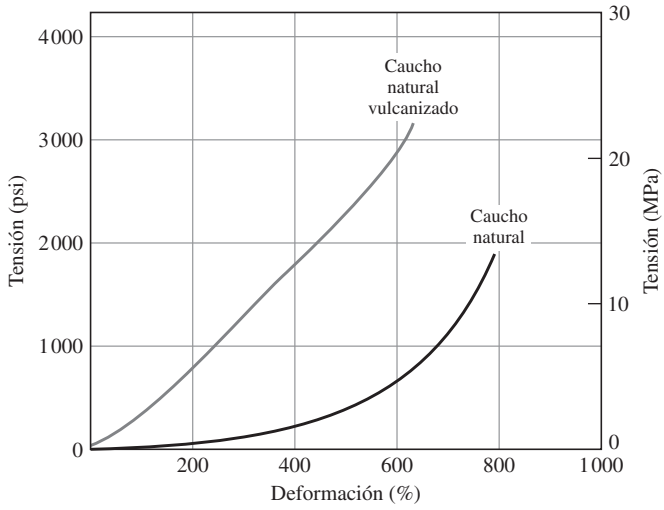


Figura 10.43
Diagramas de tensión y deformación para caucho natural vulcanizado y sin vulcanizar. Los enlaces entrecruzados de los átomos de azufre entre las cadenas del polímero de *cis*-1,4 poliisopreno por la vulcanización aumentan la resistencia del caucho vulcanizado.
(Según M. Eisenstadt, "Introduction to Mechanical Properties of Materials", Macmillan, 1971, p. 89.)

Tabla 10.8 Algunas propiedades de elastómeros seleccionados

Elastómero	Resistencia a la tensión (ksi)†	Elongación (%)	Densidad (g/cm^3)	Temp. de operación recomendada	
				°F	°C
Caucho natural* (*cis*-1,4 poliisopreno)	2.5-3.5	750-850	0.93	−60 a 180	−50 a 82
SBR o Buna S* (butadieno-estireno)	0.2-3.5	400-600	0.94	−60 a 180	−50 a 82
Nitrilo o Buna N* (butadieno-acrilonitrilo)	0.5-0.9	450-700	1.0	−60 a 250	−50 a 120
Neopreno* (policloropreno)	3.0-4.0	800-900	1.25	−40 a 240	−40 a 115
Silicona (polisiloxano)	0.6-1.3	100-500	1.1-1.6	−178 a 600	−115 a 315

*Propiedades de la goma pura vulcanizada.
†1 000 psi = 6.89 MPa.

10.9.2 Cauchos sintéticos

Los cauchos sintéticos representaron cerca de 70 por ciento del suministro total mundial de materiales de caucho en 1980. Algunos de los cauchos sintéticos importantes son el estireno-butadieno, los cauchos de nitrilo y los policloroprenos.

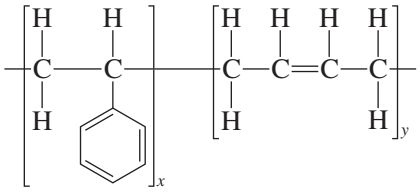


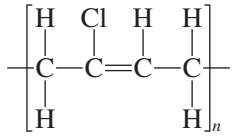
Figura 10.44
Estructura química del copolímero de caucho sintético de estireno-butadieno.

Caucho estireno-butadieno El caucho sintético más importante y el que más ampliamente se usa es el *caucho de estireno-butadieno* (SBR), un copolímero del butadieno-estireno. Después de la polimerización, este material contiene de 20 a 23 por ciento de estireno. La estructura básica del SBR se ilustra en la figura 10.44.

Por el hecho de que los meros de butadieno contienen dobles enlaces, este copolímero puede ser endurecido con azufre por enlaces entrecruzados. El butadieno por sí mismo, cuando se sintetiza con un catalizador estereoespecífico para producir el isómero cis, tiene aún más elasticidad que el caucho natural porque el grupo metilo unido al doble enlace en el caucho natural no existe en el mero de butadieno. La presencia de estireno en el copolímero produce un caucho más tenaz y resistente. El grupo del lado del fenilo del estireno que está disperso a lo largo de la cadena principal del copolímero, reduce la tendencia de dicho polímero a cristalizar cuando se somete a altos esfuerzos. El caucho SBR tiene un costo más bajo que el caucho natural y, por tanto, se usa en múltiples aplicaciones del caucho. Por ejemplo, para cuerdas de neumáticos, el SBR tiene mejor resistencia al uso pero genera más calor. Una desventaja del SBR y del caucho natural es que absorben disolventes orgánicos, como gasolina y aceite, y se hinchan.

Cauchos de nitrilo Los cauchos de nitrilo son copolímeros de butadieno y acrilonitrilo con proporciones que varían de 55 a 82 por ciento de butadieno, y de 45 a 18 por ciento de acrilonitrilo. La presencia de los grupos nitrilo aumenta el grado de polaridad en las cadenas principales y los enlaces de hidrógeno entre las cadenas adyacentes. Los grupos nitrilo proporcionan buena resistencia a aceites y disolventes, además de mejorar la resistencia a la abrasión y el calor. Por otra parte, se reduce la flexibilidad molecular. Los cauchos de nitrilo son más costosos que los cauchos ordinarios, por lo cual el uso de estos polímeros se limita a aplicaciones especiales, como mangueras de combustible y juntas en las que se requiere alta resistencia a aceites y disolventes.

Policloropreno (neopreno) Los cauchos de policloropreno o neopreno son similares al isopreno, excepto que el grupo metilo unido al doble enlace de carbono ha sido reemplazado por un átomo de cloro:



Unidad estructural de policloropreno (neopreno)

La presencia del átomo de cloro aumenta la resistencia de los dobles enlaces al ser atacados por el oxígeno, ozono, calor, luz y diversas condiciones ambientales. Los neoprenos tienen también buena resistencia a los combustibles y al aceite, e incrementan su resistencia más que los cauchos ordinarios. Sin embargo, tienen una flexibilidad más pobre a bajas temperaturas y su costo es más alto. Por estas razones, los neoprenos se usan en aplicaciones especiales como recubrimientos de alambres y cables, mangueras y cinturones industriales, o sellos y diafragmas automotrices.

10.9.3 Propiedades de los elastómeros de policloropreno

El neopreno se vende a sus fabricantes como un caucho sintético crudo. Antes de convertirlo en productos útiles, deben mezclarlo con sustancias químicas, cargas y soportes seleccionados para el procesado. Entonces, al compuesto resultante se le da forma o se moldea y vulcaniza. Las propiedades de este producto terminado dependen de la cantidad de neopreno crudo y de los ingredientes con que se haya mezclado. En la tabla 10.9 se muestra una lista de propiedades físicas básicas del policloropreno como caucho crudo, goma vulcanizada y productos vulcanizados con carga de negro de humo.

10.9.4 Vulcanización de los elastómeros de policloropreno

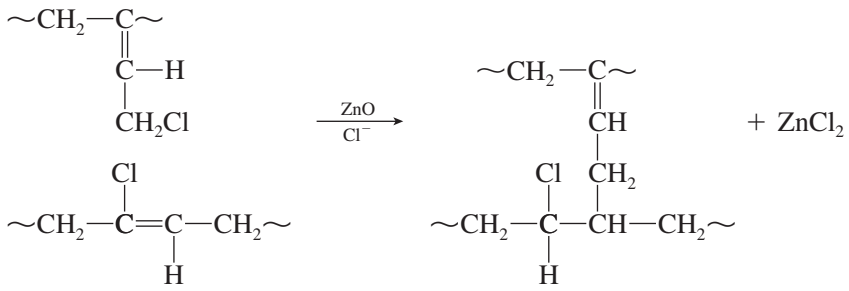
La vulcanización de los elastómeros de policloropreno depende más de los óxidos metálicos que del azufre, el cual se utiliza en múltiples materiales elastoméricos. Los que

Tabla 10.9 Propiedades físicas básicas de policloroprenos

		Vulcanizados	
Propiedades	**Polímero crudo**	**Goma**	**Negro de humo**
Densidad (g/cm^3)	1.23	1.32	1.42
Coeficiente de expansión vol.		610	
$\beta = 1/v \cdot \delta v/\delta T$, κ^{-1}	600×10^{-6}	720×10^{-6}	
Propiedades térmicas			
temperatura de transición vítrea, K (°C)	228 (−45)	228 (−45)	230 (−43)
capacidad calórica, *Cp* [kJ/(kg · K)^b]	2.2	2.2	1.7-1.8
conductividad térmica [W/(m · K)]	0.192	0.192	0.210
Eléctricas			
constante dieléctrica (1 kHz)		6.5-8.1	
factor de disipación (1 kHz)		0.031-0.086	
conductividad (pS/m)		3 a 1 400	
Mecánicas			
elongación final (%)		800-1 000	500-600
resistencia a la tensión, MPa (ksi)		25-38 (3.6-5.5)	21-30 (3.0-4.3)
módulo de Young, MPa (psi)		1.6 (232)	3-5 (435-725)
Resiliencia (%)		60-65	40-50

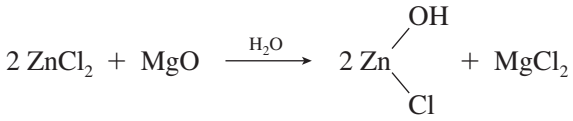
Según "Neoprene Synthetic Elastomers", *Ency. Chem. & Tech.,* 3a. ed., vol. 8 (1979), Wiley, p. 516.

se usan más comúnmente son los óxidos de zinc y magnesio. Se cree que el proceso de vulcanización se lleva a cabo conforme a la siguiente reacción:

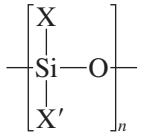


Posible reacción química durante la vulcanización del policloropreno

El cloruro de zinc que se forma es un catalizador activo para la vulcanización y, a menos que sea eliminado, puede causar problemas durante el procesado posterior. El MgO puede actuar como estabilizador para eliminar al $ZnCl_2$ de la siguiente manera:

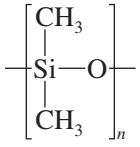


Cauchos de silicona El átomo de silicio, como el de carbono, tiene una valencia de 4 y es capaz de formar moléculas poliméricas por medio de enlaces covalentes. Sin embargo, el polímero de silicona tiene unidades de silicio y oxígeno que se repiten, como se muestra en el siguiente diagrama:



Unidad estructural básica que se repite en un polímero de silicona

donde X y X′ pueden ser átomos de hidrógeno o grupos tales como el metilo (CH_3—) o fenilo (C_6H_5—). Los polímeros de silicona que se basan en silicio y oxígeno en la cadena principal, se llaman *silicones*. De los múltiples elastómeros de silicona, el tipo más común es aquel en el que la X y la X′ de la unidad que se repite son grupos metilo:



Unidad estructural que se repite en el polidimetil siloxano

Este polímero se llama *polidimetil siloxano* y puede formar enlaces entrecruzados a temperatura ambiente mediante la adición de un iniciador (por ejemplo, peróxido de benzoilo), el cual hace reaccionar los dos grupos metilo junto con la eliminación de gas

hidrógeno (H_2) para formar Si—CH_2—CH_2—Si en forma de puentes. Otros tipos de siliconas se pueden curar a altas temperaturas (por ejemplo, 50 a 150°C), dependiendo del producto y el uso al que se destinen.

Los cauchos de silicona tienen la importante ventaja de que pueden usarse en un amplio rango de temperaturas (es decir, de –100 a 250°C). Algunas aplicaciones de los cauchos de silicona son: selladores, juntas, aislamiento eléctrico, cables de encendido y cubiertas para bujías de vehículos.

PROBLEMA DE EJEMPLO 10.6

¿Cuánto azufre debe añadirse a 100 g de caucho de poliisopreno para entrecruzar 5 por ciento de los meros? Suponga que se usa todo el azufre disponible y que solamente un átomo de azufre interviene en cada enlace entrecruzado.

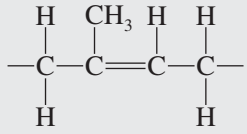
■ Solución

Como se mostró en la figura 10.41*b*, un átomo de azufre interviene, en promedio, con un mero de poliisopreno en el entrecruzamiento. Primero se determinará el peso molecular del mero de poliisopreno.

$$\text{Peso molecular (poliisopreno)} = 5\text{ C átomos} \times 12\text{ g/mol} + 8\text{ H átomos} \times 1\text{ g/mol} = 68.0\text{ g/mol}$$

Por tanto, con 100 g de poliisopreno se tienen 100 g/(68.0 g/mol) = 1.47 moles de poliisopreno. Para 100 por ciento de entrecruzamiento con azufre, se necesitan pues 1.47 moles de S o

$$1.47\text{ moles} \times 32\text{ g/mol} = 47.0\text{ g azufre}$$



Mero de poliisopreno

Para un entrecruzamiento de 5 por ciento de los enlaces, sólo se necesita

$$0.05 \times 47.0\text{ g S} = 2.35\text{ g S} \blacktriangleleft$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 10.7

Un caucho butadieno estireno se fabrica mediante la polimerización de un monómero de estireno con ocho monómeros de butadieno. Si 20 por ciento de los sitios de entrecruzamiento se van a enlazar con azufre, ¿qué porcentaje en peso de azufre se requiere?

■ Solución

Base: 100 g de copolímero

En el copolímero tenemos un mol de estireno combinado con ocho moles de polibutadieno. Por tanto, sobre una base en peso se tiene:

$$8\text{ moles de polibutadieno} \times 54\text{ g/mol} = 432\text{ g}$$
$$1\text{ mol de poliestireno} \times 104\text{ g/mol} = \underline{104\text{ g}}$$
$$\text{Peso total del copolímero} = 536\text{ g}$$

La razón en peso del polibutadieno al copolímero = 432/536 = 0.806
Por tanto, en 100 g de copolímero se tienen 100 g × 0.806 = 80.6 g de butadieno o 80.6 g/54 g = 1.493 moles de polibutadieno.

Gramos de S para 20 por ciento de entrecruzamiento = (1.493 moles)(32 g/mol)(0.20) = 9.55 g S.

$$\text{Porcentaje en peso de S} = \left(\frac{9.55\text{ g}}{100\text{ g} + 9.55\text{ g}}\right)100\% = 8.72\% \blacktriangleleft$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 10.8

Un caucho de butadieno-acrilonitrilo se fabrica mediante la polimerización de un monómero de acrilonitrilo con tres monómeros de butadieno. ¿Cuánto azufre se requiere para que el material reaccione con 100 kg de este caucho a fin de obtener 20 por ciento de enlaces cruzados en los lugares de entrecruzamiento?

■ Solución

Base: 100 g del copolímero

3 moles de polibutadieno × 54 g = 162 g
1 mol de poliacrilonitrilo × 53 g = 53 g
Peso total del copolímero = 215 g

La razón en peso de polibutadieno a copolímero = 162 g/215 g = 0.7535

En 100 g de copolímero se tienen 100 g × 0.7535 = 75.35 g o 75.35 g/54 g/mol = 1.395 mol

El peso de S para 20 por ciento de enlaces cruzados = (1.395 moles)(32 g/mol)(0.20) = 8.93 g S o 8.93 kg.

10.10 DEFORMACIÓN Y REFUERZO DE LOS MATERIALES PLÁSTICOS

10.10.1 Mecanismos de deformación para los termoplásticos

La deformación de los materiales termoplásticos puede ser principalmente elástica, plástica (permanente) o una combinación de ambos tipos. Por abajo de sus temperaturas de transición vítrea, los termoplásticos se deforman principalmente por deformación elástica según se observa por los valores de –40 y 68°C que corresponden al polimetilmetacrilato en la gráfica de esfuerzo-deformación, como se muestra en la figura 10.45. Por arriba de sus temperaturas de transición vítrea, los termoplásticos se deforman principalmente de manera plástica, como lo indican los valores de 122 y 140°C para el PMMA en las gráficas de esfuerzo y deformación de la figura 10.45. Por tanto, los termoplásticos pasan por una transición de frágil a dúctil al ser calentados pasando por su temperatura de transición vítrea. Los PMMA experimentan una transición de frágil a dúctil entre 86 y 104°C porque la T_g de los PMMA se encuentra en este rango de temperatura.

En la figura 10.46 se ilustran esquemáticamente los principales mecanismos atómicos y moleculares que se presentan durante la formación de polímeros de cadena

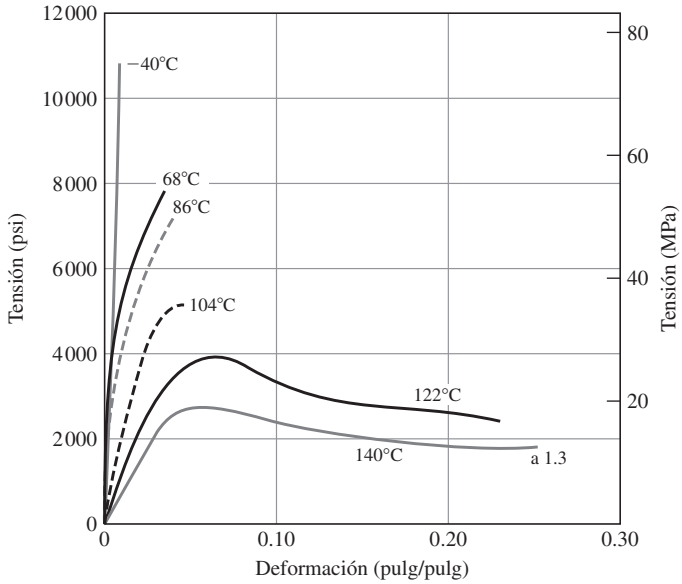


Figura 10.45
Curvas de resistencia a la tensión *versus* deformación del metacrilato de polimetilo a diversas temperaturas. Se presenta una transición de frágil a dúctil entre 86 y 104°C.
(Según T. Alfrey, "Mechanical Behavior of Polymers", Wiley-Interscience, 1967.)

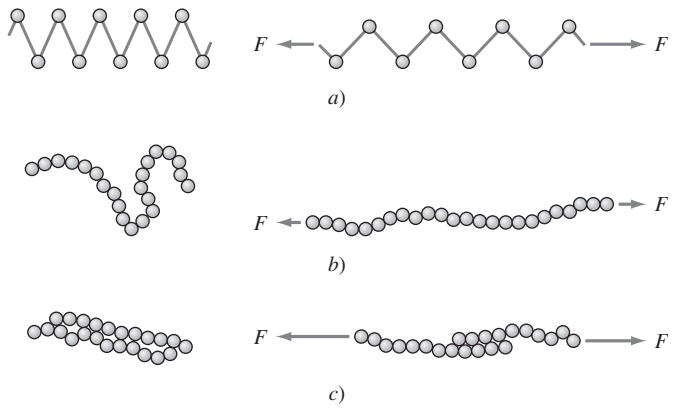


Figura 10.46
Mecanismos de deformación en materiales poliméricos: *a*) deformación elástica por extensión de los enlaces covalentes de la cadena principal de carbono, *b*) deformación elástica o plástica al desenrollarse la cadena principal y *c*) deformación plástica por deslizamiento de la cadena.
(Según M. Eisenstadt, "Introduction to Mechanical Properties of Materials", Macmillan, 1971, p. 264.)

larga en un material termoplástico. En la figura 10.46*a*, la deformación elástica está representada como una elongación de los enlaces covalentes dentro de las cadenas moleculares. En la figura 10.46*b*, la deformación elástica o plástica se representa al desenrollarse los polímeros lineales. Por último, en la figura 10.46*c*, la deformación plástica se representa por el deslizamiento de las cadenas moleculares entre sí por medio del rompimiento y restauración de las fuerzas secundarias de enlace bipolar.

10.10.2 Refuerzo de los termoplásticos

Se analizarán los siguientes factores, cada uno de los cuales determina parcialmente la resistencia de un termoplástico: 1) la masa molecular promedio de las cadenas del polímero, 2) el grado de cristalización, 3) el efecto de los grupos laterales masivos sobre las cadenas principales, 4) el efecto de átomos altamente polares sobre las cadenas principales, 5) el efecto de los átomos de oxígeno, nitrógeno y azufre en las cadenas de carbono principales, 6) el efecto de los anillos de fenilo en las cadenas principales y 7) la adición de refuerzos de fibra de vidrio.

Refuerzo debido a la masa molecular promedio de las cadenas de polímero La resistencia de un material termoplástico depende directamente de su masa molecular promedio, puesto que se requiere la polimerización hasta cierto rango de masa molecular para producir un sólido estable. Sin embargo, este método no se usa normalmente para controlar las propiedades de resistencia porque, en la mayoría de los casos, una vez que se alcanza un rango de masa molecular crítico, el aumento de la masa molecular promedio de un material termoplástico no incrementa en gran medida su resistencia. En la tabla 10.10 se presenta una lista de los rangos de masa molecular y de los grados de polimerización para algunos termoplásticos.

Refuerzo por incremento de la cantidad de material cristalino en un material termoplástico La cantidad de material cristalino dentro de un termoplástico puede afectar en gran medida su resistencia a la tensión. En general, cuando el grado de cristalinidad del termoplástico aumenta, la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad a la tensión y la densidad del material se incrementan.

Los termoplásticos que pueden cristalizar durante la solidificación tienen una simetría estructural sencilla respecto a sus cadenas moleculares. Los polietilenos y los nailon son ejemplos de termoplásticos que pueden solidificar con una cantidad considerable de cristalización en su estructura. En la figura 10.47 se comparan los diagramas de esfuerzo-deformación para polietilenos de baja y alta densidad. El polietileno de baja densidad tiene menor cantidad de cristalinidad y, por tanto, menor resistencia y módulo de elasticidad a la tensión que el polietileno de alta densidad. Puesto que en el polietileno de baja densidad las cadenas moleculares son más ramificadas y están

Tabla 10.10 Masas moleculares y grados de polimerización para algunos termoplásticos

Termoplásticos	Masa molecular (g/mol)	Grado de polimerización
Polietileno	28 000-40 000	1 000-1 500
Policloruro de vinilo	67 000 (promedio)	1 080
Poliestireno	60 000-500 000	600-6 000
Polihexametilenadipamida (nailon 6,6)	16 000-32 000	150-300

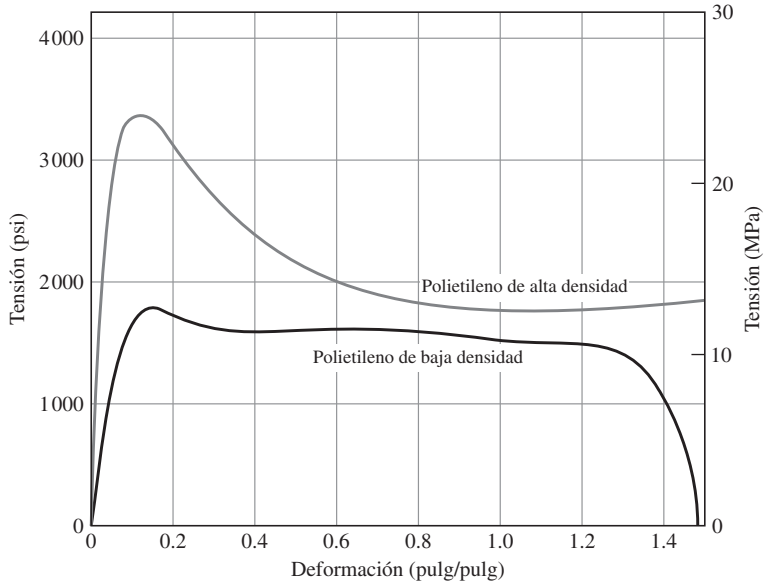


Figura 10.47
Curvas de tensión-deformación para polietileno de baja y de alta densidad. El polietileno de alta densidad es más rígido y resistente porque su grado de cristalinidad es más alto.
[*Según J. A. Sauer y K. D. Pae. Mechanical Properties of High Polymers, en H. S. Kaufman y J. J. Falcetta (eds.), "Introduction to Polymer Science and Technology", Wiley, 1977, p. 397.*]

más alejadas entre sí, las fuerzas de enlace entre las cadenas son menores y por consiguiente el polietileno de baja densidad tiene menor resistencia. Los máximos en la curva de tensión-deformación se deben al adelgazamiento de las secciones transversales de las muestras de prueba durante las pruebas de tensión.

Otro ejemplo del efecto del aumento de la cristalinidad sobre la resistencia a la tensión (cedencia) de un material termoplástico se muestra en la figura 10.48 para el nailon 6,6. La resistencia incrementada del material más altamente cristalizado se debe al empacamiento más compacto de las cadenas del polímero, lo que da lugar a fuerzas de enlace intermoleculares más fuertes entre las cadenas.

Refuerzo de los termoplásticos por la introducción de grupos atómicos pendientes sobre las cadenas principales de carbono El deslizamiento de la cadena durante la deformación permanente de los termoplásticos se puede hacer más difícil mediante la introducción de grupos laterales masivos en la cadena de carbono principal. Este método de refuerzo de termoplásticos se usa, por ejemplo, para el polipropileno y el poliestireno. El módulo de tensión, que es una medida de la rigidez de un material, se eleva del rango de 0.6 a 1.5 $\times$ 10^5 psi en el polietileno de alta densidad, entre 1.5 y 2.2 $\times$ 10^5 psi en el polipropileno, que tiene grupos metílicos insertados unidos a la cadena de carbono principal. El módulo elástico a la tensión del polietileno se eleva todavía más, al rango de 4 a 5 $\times$ 10^5 psi con la introducción de los anillos de fenilo insertados a la cadena principal de carbono más voluminosos para formar poliestireno. Sin embargo, la elongación hasta la fractura se re-

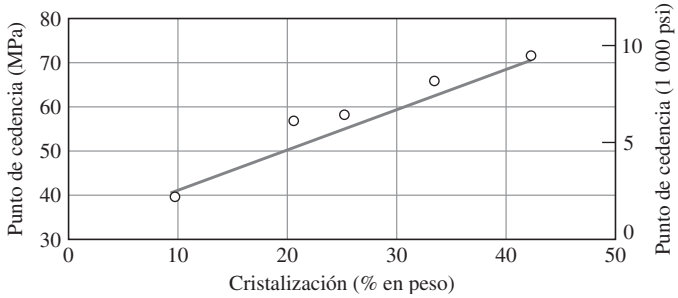


Figura 10.48
Punto de cedencia de poliamida seca (nailon 6,6) en función de la cristalinidad.
[*Según R. J. Welgos, Polyamides (General), en "Encyclopedia of Chemical Technology", vol. 18, Wiley, 1982, p. 331.*]

duce drásticamente entre 100 a 600 por ciento en el polietileno de alta densidad a 1 a 2.5 por ciento en el poliestireno. Por tanto, los grupos laterales voluminosos sobre las cadenas principales de carbono de los termoplásticos aumentan su rigidez y resistencia, pero reducen su ductilidad.

Refuerzo de los termoplásticos por enlace de átomos altamente polares a la cadena de carbono principal Un aumento considerable en la resistencia del polietileno se puede obtener introduciendo un átomo de cloro en cada uno de los átomos de carbono de la cadena de carbono principal para producir policloruro de vinilo. En este caso, el átomo de cloro, grande y altamente polar, incrementa en forma considerable las fuerzas de enlace moleculares entre las cadenas del polímero. El policloruro de vinilo rígido tiene una resistencia a la tensión de 6 a 11 ksi, que es bastante más alta que la resistencia de 2.5 a 5 ksi del polietileno. En la figura 10.49 se muestra una gráfica de esfuerzo a la tensión y deformación para una muestra de prueba de policloruro de vinilo que tiene un esfuerzo de fluencia máximo de unos 8 ksi. El pico de cadencia en la curva se debe al adelgazamiento de la parte central de la muestra de prueba durante la extensión.

Refuerzo de los termoplásticos por la introducción de átomos de oxígeno y nitrógeno en la cadena de carbono principal Introduciendo un enlace de éter $-\overset{|}{\underset{|}{C}}-O-\overset{|}{\underset{|}{C}}-$ en la cadena de carbono principal, se aumenta la rigidez de los termoplásticos, como es el caso del polioximetileno (acetal), cuya unidad química que se repite es $-\left[\begin{array}{c}H\\|\\C-O\\|\\H\end{array}\right]_n-$. La resistencia a la tensión de este material está en el rango de 9 a 10 ksi, que es considerablemente mayor que el de 2.5 a 5.5 ksi de resistencia del polietileno de alta densidad. Los átomos de oxígeno en las cadenas de carbono principales incrementan también el enlace dipolar permanente entre las cadenas del polímero.

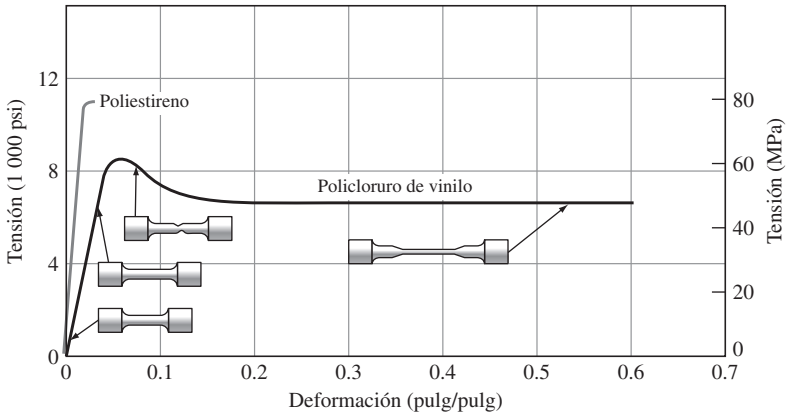


Figura 10.49
Datos de tensión-deformación para el termoplástico amorfo policloruro de vinilo (PVC) y el poliestireno (PS). Los dibujos presentan diversos modos de deformación de la muestra en varios puntos sobre la curva de esfuerzo-deformación.
[*Según J. A. Sauer y K. D. Pae, Mechanical Properties of High Polymers, en H. S. Kaufman y J. J. Falcetta (eds.), "Introduction to Polymer Science and Technology", Wiley, 1977, p. 331.*]

Al introducir nitrógeno en las cadenas principales de los termoplásticos, como en el caso del enlace amida $\left(\begin{array}{c}\text{O}\\ \|\\ \text{—C—N—}\end{array}\right)$, las fuerzas bipolares permanentes entre las cadenas del polímero se incrementan en gran medida debido a los enlaces de hidrógeno (figura 10.35). La resistencia a la tensión relativamente alta de 9 a 12 ksi del nailon 6,6 es el resultado de enlaces de hidrógeno entre las uniones amida de las cadenas del polímero.

Refuerzo de los termoplásticos por introducción de anillos de fenileno en la cadena principal del polímero en combinación con otros elementos, por ejemplo, As, O, N y S en la cadena principal Uno de los métodos más importantes para el refuerzo de los termoplásticos es la introducción de anillos de fenileno en la cadena de carbono principal. Este método de refuerzo se usa comúnmente en plásticos de ingeniería de alta resistencia. Los anillos de fenileno provocan un impedimento estérico a la rotación dentro de la cadena del polímero y a la atracción electrónica de los electrones en resonancia entre las moléculas adyacentes. Ejemplos de materiales poliméricos que contienen anillos de fenileno son los materiales a base de óxido de polifenileno, que tienen resistencias a la tensión de 7.8 a 9.6 ksi, los poliésteres termoplásticos cuya resistencia a la tensión es de unos 10 ksi y los policarbonatos que tienen resistencias de 9 ksi, aproximadamente.

Refuerzo de termoplásticos por la acción de fibras de vidrio Algunos termoplásticos se refuerzan con fibras de vidrio. El contenido de vidrio de la mayoría de los termoplásticos con carga de vidrio varía entre 20 y 40 por ciento en peso. El

contenido óptimo de vidrio es un balance entre la resistencia deseada, el costo total y la facilidad de procesado. Los termoplásticos comúnmente reforzados con fibras de vidrio incluyen nailon, policarbonatos, óxidos de polifenileno, sulfuro de polifenileno, polipropileno, ABS y poliacetal. Por ejemplo, la resistencia a la tensión del nailon 6,6 se puede incrementar de 12 a 30 ksi con un contenido de fibra de vidrio de 40 por ciento, pero su elongación se reduce de 60 a 2.5 por ciento por la adición de fibra de vidrio.

10.10.3 Refuerzo de plásticos termofijos

Los plásticos termofijos sin refuerzo adquieren mayor resistencia con la creación de una red de enlaces covalentes a través de la estructura del material. La red covalente se produce por medio de la reacción química que ocurre en el material termofijo después del curado o durante el prensado bajo calor y presión. Los fenólicos, epóxicos y poliésteres (insaturados) son ejemplos de materiales reforzados por este método. Debido a su red de enlaces covalentes, estos materiales tienen valores relativamente altos de resistencia, módulo elástico y rigidez, considerando que son materiales plásticos. Por ejemplo, la resistencia a la tensión de la resina fenólica moldeada es de, aproximadamente, 9 ksi, la de los poliésteres endurecidos es de unos 10 ksi y la de la resina epóxica endurecida se aproxima a los 12 ksi. Todos estos materiales tienen baja ductilidad debido a su estructura reticular enlazada de tipo covalente.

La resistencia de los termoplásticos se puede incrementar en alto grado con la adición de materiales de refuerzo. Por ejemplo, la resistencia a la tensión de las resinas fenólicas con carga de vidrio puede aumentar hasta 18 ksi. Los compuestos moldeados en lámina con base de poliéster y cargados de vidrio pueden tener una resistencia a la tensión hasta de 20 ksi. Usando laminados unidireccionales de resina de base epóxica reforzada con fibra de carbono, se pueden obtener materiales con una resistencia a la tensión hasta de 250 ksi en una dirección. Los materiales compuestos reforzados de alta resistencia de este tipo se tratarán en el capítulo 12, Materiales compuestos.

10.10.4 Efecto de la temperatura sobre la resistencia de los materiales plásticos

Una característica de los termoplásticos es que se reblandecen gradualmente a medida que aumenta la temperatura. En la figura 10.50 se muestra este comportamiento en un grupo de termoplásticos. A medida que la temperatura aumenta, las fuerzas de enlace secundarias entre las cadenas moleculares se vuelven más débiles y la resistencia del termoplástico disminuye. Cuando un material termoplástico se calienta pasando por su temperatura de transición vítrea T_g, su resistencia disminuye en gran medida debido a la marcada disminución de las fuerzas de enlace secundarias. En la figura 10.45 se muestra este efecto en el polimetilmetacrilato, el cual tiene una T_g de unos 100°C. La resistencia a la tensión del PMMA es de, aproximadamente, 7 ksi a 86°C, la cual está por debajo de su T_g, y disminuye hasta cerca de 4 ksi a 122°C, que está por arriba de su T_g. Las temperaturas de uso máximas de algunos termoplásticos se muestran en una lista en las tablas 10.2 y 10.5.

Los plásticos termofijos también se debilitan al ser calentados, pero como sus átomos están enlazados juntos, principalmente con enlaces covalentes fuertes formando una red, no se vuelven viscosos a temperaturas elevadas sino que se degradan y carbonizan por arriba de su temperatura de uso máxima. En general, los termofijos son

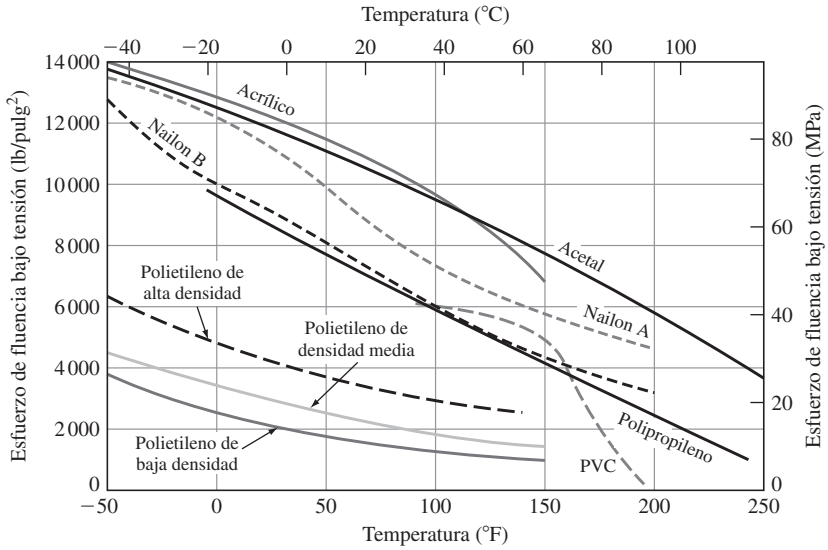


Figura 10.50
Efecto de la temperatura en el esfuerzo de fluencia bajo tensión de algunos termoplásticos.
(Según H. E. Barker y A. E. Javitz, Plastic Molding Materials for Structural and Mechanical Applications, Electr. Manuf., mayo de 1960.)

más estables a altas temperaturas que los termoplásticos, pero algunos termoplásticos tienen una notable estabilidad a altas temperaturas. Las temperaturas de uso máximas de algunos termofijos se muestran en la tabla 10.7.

10.11 FLUENCIA Y FRACTURA DE LOS MATERIALES POLIMÉRICOS

10.11.1 Fluencia de los materiales poliméricos

Los materiales poliméricos sometidos a una carga pueden deformarse. O sea, que su deformación bajo una carga aplicada constante a una temperatura constante continúa aumentando con el tiempo. La magnitud del incremento de deformación aumenta de acuerdo con el incremento del esfuerzo aplicado y de la temperatura. En la figura 10.51 se muestra cómo la deformación del poliestireno aumenta bajo el esfuerzo de tensión de 1 760 a 4 060 psi (12.1 a 30 MPa) a 77°F.

La temperatura a la cual tiene lugar la deformación plástica de un material polimérico es también un factor importante para la determinación de la velocidad de fluencia. A temperaturas por debajo de las temperaturas de transición vítrea para termoplásticos, la velocidad de fluencia es relativamente baja debido a la movilidad restringida de la cadena molecular. Por arriba de sus temperaturas de transición vítrea, los termoplásticos se deforman con más facilidad por una combinación de deformación elástica y plástica que se conoce como *comportamiento viscoelástico*. Por arriba de la temperatura de transición vítrea, las cadenas moleculares se deslizan una sobre otra con

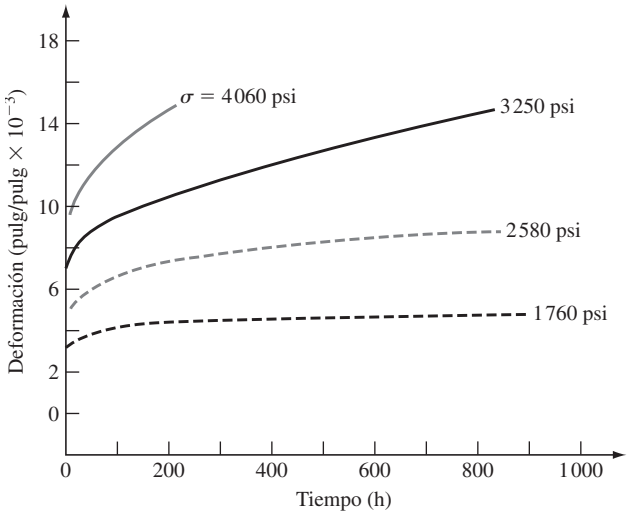


Figura 10.51
Curvas de fluencia para poliestireno bajo diversos esfuerzos de tensión a 77°F.
[Según J. A. Sauer, J. Marin y C. C. Hsiao, J. Appl. Phys., **20:***507(1949).]*

mayor facilidad, y por eso este tipo de deformación más fácil se conoce a veces como *flujo viscoso.*

En la industria, la deformación plástica de los materiales poliméricos se mide por el módulo de fluencia, que es sencillamente la razón entre el esfuerzo inicial aplicado σ_0 y la deformación por fluencia $\epsilon(t)$ al cabo de cierto tiempo y a una temperatura de prueba constante. Por tanto, un valor alto del módulo de fluencia de un material implica una tasa baja de velocidad de fluencia. En la tabla 10.11 se ofrece una lista de los módulos de fluencia de varios plásticos a diferentes niveles de esfuerzo, dentro del rango de 1 000 a 5 000 psi. En esta tabla se muestra el efecto de los grupos laterales masivos y de fuerzas intermoleculares fuertes en la reducción de la velocidad de fluencia de los materiales poliméricos. Por ejemplo, a 73°F el polietileno tiene un módulo de fluencia de 62 ksi a un nivel de esfuerzo de 1 000 psi por 10 h, mientras que el PMMA tiene un módulo de fluencia mucho más alto de 410 ksi para el mismo nivel de esfuerzo en el mismo tiempo.

El refuerzo de los plásticos con fibras de vidrio incrementa en gran medida sus módulos de fluencia y reduce sus velocidades de fluencia. Por ejemplo, el nailon 6,6 no reforzado tiene un módulo de fluencia de 123 ksi después de estar 10 h a 1 000 psi, pero cuando se refuerza con 33 por ciento de fibra de vidrio, su módulo de fluencia aumenta a 700 ksi después de estar 10 h a 4 000 psi. La adición de fibra de vidrio a materiales plásticos es un método importante para incrementar su resistencia a la fluencia y también para reforzarlos.

10.11.2 Relajación de esfuerzos en los materiales poliméricos

La relajación de esfuerzos en un material polimérico sometido a deformación constante da por resultado una disminución del esfuerzo con el tiempo. La causa de la relaja-

Tabla 10.11 Módulo de fluencia de materiales poliméricos a 73°F (23°C)

	Tiempo de prueba (H)			
	10	100	1 000	
	Módulo de fluencia (ksi)			Nivel de esfuerzo (psi)
Materiales no reforzados:				
Polietileno, Amoco 31-360B1	62	36		1 000
Polipropileno, Profax 6323	77	58	46	1 500
Poliestireno, FyRid KS1	310	290	210	Modificado por impacto
Polimetil metacrilato, Plexiglás G	410	375	342	1 000
Policloruro de vinilo, baquelita CMDA 2201	…	250	183	1 500
Policarbonato, Lexan 141-111	335	320	310	3 000
Nailon 6,6, Zytel 101	123	101	83	1 000, equil. a 50% RH
Acetal, Delrin 500	360	280	240	1 500
ABS, Cycolac DFA-R	340	330	300	1 000
Materiales reforzados:				
Acetal, Thermocomp KF-1008, 30% fibra de vidrio	1 320	…	1 150	5 000, 75°F (24°C)
Nailon 6,6, Zytel 70G-332, 33% de fibra de vidrio	700	640	585	4 000, equil. a 50% RH
Poliéster, compuesto moldeado termoestable, Cyglas 303	1 310	1 100	930	2 000
Poliestireno, Thermocomp CF-1007	1 800	1 710	1 660	5 000, 75°F (24°C)

Fuente: *Modern Plastics Encyclopedia, 1984-85,* McGraw-Hill.

ción de esfuerzos es que se provoca el flujo viscoso en la estructura interna del material polimérico porque las cadenas poliméricas se deslizan lentamente entre sí debido al rompimiento y reformación de los enlaces secundarios entre las cadenas, y porque mecánicamente las cadenas se desenredan y retroceden. La relajación de esfuerzos permite que el material alcance un estado de menor energía espontáneamente si hay suficiente energía de activación para que el proceso se presente. La relajación de esfuerzos de los materiales poliméricos depende, por tanto, de la temperatura y está asociada a una energía de activación.

La velocidad a la cual se presenta la relajación de esfuerzos depende del *tiempo de relajación* τ, que es una propiedad del material y que se define como el tiempo necesario para que el esfuerzo (σ) disminuya a 0.37 ($1/e$) del esfuerzo inicial σ_0. La disminución del esfuerzo con el tiempo t está dada por

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/\tau} \qquad \textbf{(10.3)}$$

donde σ = esfuerzo después del tiempo t, σ_0 = esfuerzo inicial y τ = tiempo de relajación.

PROBLEMA DE EJEMPLO 10.9

Un esfuerzo de 1 100 psi (7.6 MPa) se aplica a un material elastomérico a deformación constante. Después de 40 días a 20°C, el esfuerzo disminuye a 700 psi (4.8 MPa). *a*) ¿Cuál es la constante relajación-tiempo para este material? *b*) ¿Cuál será el esfuerzo después de 60 días a 20°C?

■ **Solución**

a) Puesto que $\sigma = \sigma_0 e^{-t/\tau}$ [ecuación (10.3)] o $\ln(\sigma/\sigma_0) = -t/\tau$ donde $\sigma = 700$ psi, $\sigma_0 = 1\,100$ psi y $t = 40$ días,

$$\ln\left(\frac{700 \text{ psi}}{1\,100 \text{ psi}}\right) = -\frac{40 \text{ días}}{\tau} \qquad \tau = \frac{-40 \text{ días}}{-0.452} = 88.5 \text{ días} \blacktriangleleft$$

b)

$$\ln\left(\frac{\sigma}{1\,100 \text{ psi}}\right) = -\frac{60 \text{ días}}{88.5 \text{ días}} = -0.678$$

$$\frac{\sigma}{1\,100 \text{ psi}} = 0.508 \quad \text{o bien} \quad \sigma = 559 \text{ psi} \blacktriangleleft$$

Debido a que el tiempo de relajación τ es el recíproco de una velocidad, se puede relacionarlo con la temperatura en grados kelvin por una ecuación de relación tipo Arrhenius (véase la ecuación [4.12]) como

$$\frac{1}{\tau} = Ce^{-Q/RT} \tag{10.4}$$

donde C = relación constante independiente de la temperatura, Q = energía de activación para el proceso, T = temperatura en kelvin y R = constante molar de los gases = 8.314 J/(mol · K). El problema de ejemplo 10.10 muestra cómo se puede usar la ecuación 10.4 para determinar la energía de activación de un material elastomérico sometido a una relajación de esfuerzo.

PROBLEMA DE EJEMPLO 10.10

El tiempo de relajación para un elastómero a 25°C es 40 días, mientras que a 35°C el tiempo de relajación es 30 días. Calcule la energía de activación para este proceso de relajación de esfuerzos.

■ **Solución**

Utilizando la ecuación 10.4, $1/\tau = Ce^{-Q/RT}$. Para $\tau = 40$ días,

$$T_{25°C} = 25 + 273 = 298 \text{ K} \qquad T_{35°C} = 35 + 273 = 308 \text{ K}$$

$$\frac{1}{40} = Ce^{-Q/RT_{298}} \tag{10.5}$$

y

$$\frac{1}{30} = Ce^{-Q/RT_{308}} \tag{10.6}$$

Dividiendo la ecuación 10.5 entre la ecuación 10.6, se obtiene

$$\frac{30}{40} = \exp\left[-\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{298} - \frac{1}{308}\right)\right] \quad \text{o bien} \quad \ln\left(\frac{30}{40}\right) = -\frac{Q}{R}(0.003356 - 0.003247)$$

$$-0.288 = -\frac{Q}{8.314}(0.000109) \quad \text{o bien} \quad Q = 22\,000 \text{ J/mol} = 22.0 \text{ kJ/mol} \blacktriangleleft$$

10.11.3 Fractura de los materiales poliméricos

Como en el caso de los metales, la fractura de los materiales poliméricos puede considerarse como frágil, dúctil o intermedia entre los dos extremos. En general, se considera que los plásticos termofijos no reforzados se fracturan principalmente en forma frágil. Por otra parte, los termoplásticos pueden fracturarse sobre todo en forma frágil o dúctil. Si la fractura de un termoplástico ocurre por abajo de su temperatura de transición vítrea, entonces su forma de fractura será principalmente frágil, mientras que si la fractura ocurre por arriba de su temperatura de transición vítrea, su forma de fractura será dúctil. Por tanto, la temperatura puede afectar en alto grado la forma de fractura de los termoplásticos. Los plásticos termofijos calentados por arriba de la temperatura ambiente se vuelven más débiles y se fracturan a un nivel de esfuerzo menor, pero se siguen fracturando principalmente del modo frágil debido a que la red de enlaces covalentes se conserva a elevadas temperaturas. La velocidad de deformación también es un factor importante en el comportamiento de fractura de los termoplásticos, y las velocidades de deformación más lentas favorecen la fractura dúctil porque una velocidad de deformación lenta permite la realineación de la cadena molecular.

Fractura frágil de materiales poliméricos La energía de superficie requerida para que un material polimérico con apariencia de vidrio, frágil y amorfo, como el poliestireno o el polimetacrilato de metilo, se fracture, es cerca de 1 000 veces mayor que la que se requeriría si la fractura incluyera simplemente la ruptura de enlaces carbono-carbono sencillos sobre un plano de fractura. Por tanto, los materiales poliméricos con aspecto de vidrio, como el PMMA, son más tenaces que los vidrios inorgánicos. La energía adicional requerida para que los termoplásticos con aspecto de vidrio se fracturen, es mucho más alta debido a que se forman regiones distorsionadas localizadas, llamadas *grietas*, antes que ocurra el resquebrajamiento. Una grieta en un termoplástico que tiene apariencia de vidrio se forma en una región de alto esfuerzo del material y consiste en una alineación de cadenas moleculares combinada con alta densidad de huecos dispersos.

La figura 10.52 es una representación en forma de los diagramas del cambio que ocurre en la estructura molecular cuando hay un agrietamiento en un termoplástico con apariencia de vidrio, por ejemplo, el PMMA. Si el esfuerzo es lo bastante intenso, se forma un resquebrajamiento a través de la grieta, como se muestra en la figura 10.53 y en la fo-

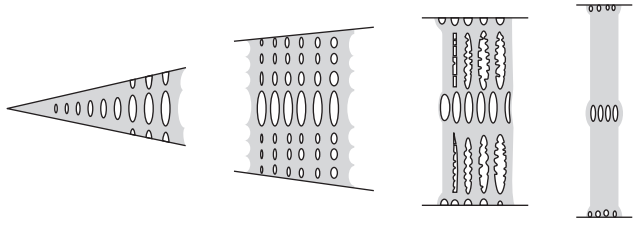


Figura 10.52
Representación en forma de diagrama del cambio en la microestructura de una grieta en un termoplástico vidriado a medida que aquélla se agranda.
[Según P. Beahan, M. Bevis y D. Hull, J. Mater. Sci., **8:***162(1972)].*

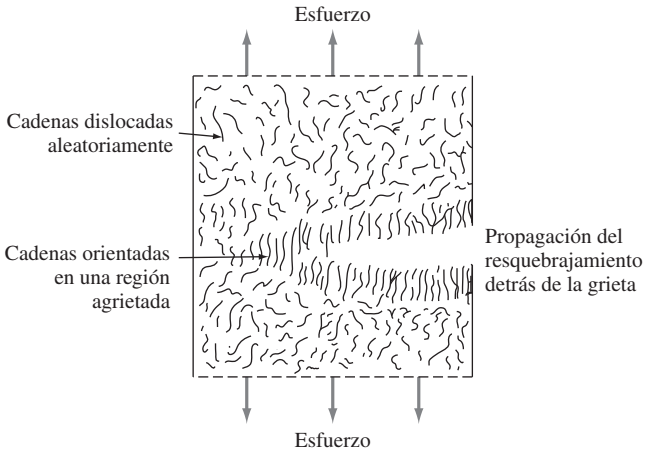


Figura 10.53
Ilustración esquemática de la estructura de un agrietamiento cercano al extremo de una fisura en un termoplástico vidriado.

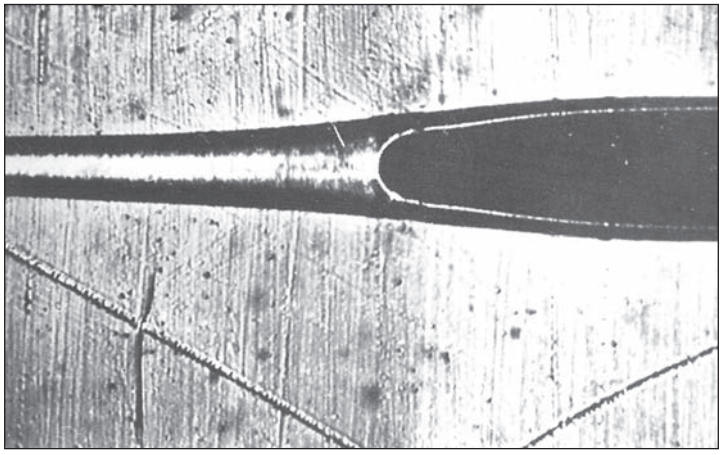


Figura 10.54
Foto de una fisura a través del centro de un agrietamiento en un termoplástico vidriado
(Según D. Hull, "Polymeric Materials", American Society of Metals, 1975, p. 511.)

to de la figura 10.54. Cuando el resquebrajamiento se propaga a lo largo de la grieta, la concentración de esfuerzos en la punta de la hendidura se extiende a lo largo de todo el agrietamiento. El trabajo realizado en la alineación de las moléculas de polímero dentro de la grieta es la causa por la cual se requiere una cantidad relativamente alta de trabajo para la fractura de los materiales poliméricos con apariencia de vidrio. Esto explica por qué las energías de fractura del poliestireno y del PMMA se encuentran entre 300 y 1 700 J/m^2 en vez de un valor cercano a 0.1 J/m^2, que es el nivel de energía que cabría esperar si solamente se rompieran enlaces covalentes durante el proceso de fractura.

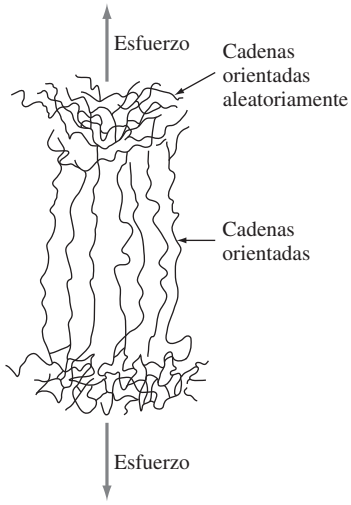


Figura 10.55
Deformación plástica de un material polimérico termoplástico bajo esfuerzo. Las cadenas moleculares están desenredadas y se deslizan entre sí de modo que se alinean en la dirección del esfuerzo. Si el esfuerzo es demasiado grande, las cadenas moleculares se rompen y provocan la fractura del material.

Fractura dúctil de materiales poliméricos Por arriba de sus temperaturas de transición vítrea, los termoplásticos pueden presentar deformación plástica antes de la fractura. Durante la deformación plástica, las cadenas lineales moleculares se desenredan y se deslizan unas sobre otras y gradualmente se alinean más cerca unas de otras en la dirección del esfuerzo aplicado (figura 10.55). Con el tiempo, cuando el esfuerzo sobre las cadenas se vuelve demasiado alto, los enlaces covalentes de las cadenas principales se rompen y se presenta la fractura del material. Los materiales elastoméricos se deforman esencialmente de la misma manera, excepto que en ellos la cadena se desenreda en mayor grado (deformación elástica); pero finalmente si el esfuerzo sobre el material es demasiado alto y la extensión de sus cadenas moleculares demasiado grande, los enlaces covalentes de las cadenas principales se rompen provocando la fractura del material.

10.12 POLÍMEROS EN APLICACIONES BIOMÉDICAS: BIOPOLÍMEROS

Los polímeros ofrecen la mayor versatilidad como biomateriales. Han sido utilizados en el tratamiento de diversas patologías incluso de carácter cardiovascular, oftálmico y ortopédico, en componentes de implantes permanentes. También han sido aplicados

como remedios provisionales en áreas tales como angioplastia coronaria, hemodiálisis y tratamiento de heridas. La aplicación de los polímeros en odontología, como implantes, cementos dentales y bases de dentadura, tiene también gran interés e importancia. Aunque los polímeros son inferiores a los metales y a las cerámicas en términos de propiedades de resistencia, poseen características que los hacen muy atractivos en aplicaciones biomédicas, entre ellas su baja densidad, su facilidad al moldeo y la posibilidad de modificarlos para lograr una biocompatibilidad máxima. La mayoría de los biomateriales poliméricos son termoplásticos y sus propiedades mecánicas, aunque inferiores a las de los metales y materiales cerámicos, son aceptables en múltiples aplicaciones. Uno de los avances más recientes en este campo es el de los **polímeros biodegradables.** Los polímeros biodegradables se diseñan para desempeñar una función y finalmente ser absorbidos o integrados en el sistema biológico. Por tanto, la eliminación quirúrgica de estos componentes no es necesaria. En las siguientes secciones se tratarán las aplicaciones de los biopolímeros en diversas áreas médicas.[11]

10.12.1 Aplicaciones cardiovasculares de los polímeros

Los **biopolímeros** se usan con éxito en válvulas cardíacas. Las válvulas cardíacas humanas son propensas a sufrir enfermedades como la estenosis y la insuficiencia. La estenosis se presenta porque la válvula cardíaca se vuelve rígida y eso impide que se abra completamente. La insuficiencia es una condición en la cual la válvula cardíaca permite cierto reflujo de sangre. Ambas condiciones son peligrosas y se deben tratar mediante el reemplazo de la válvula cardíaca dañada, ya sea con una válvula de tejido (animal o cadavérico) o con una válvula artificial. Una representación del diseño más reciente de una válvula cardíaca artificial se muestra en la figura 10.56. La prótesis consiste en un reborde, dos foliolos semicirculares y un aro de costura. El reborde y los foliolos pueden hacerse con materiales tales como aleaciones de Ti o Co-Cr. El aro está hecho de biopolímeros como PTFE (Teflón) expandido o PET (Dacrón) (véase la sección 10.7.5). Tiene la función crucial de conectar la válvula al tejido cardíaco mediante la aplicación de suturas. Los materiales poliméricos son los únicos materia-

[11] *Fuentes: http://www.me.utexas.edu/~uer/heartvalves/mechanics.html*; Handbook of Materials for Medical Devices, J. R. Davis (ed.), ASM International, 2003; y Medical Device Materials, Proceedings of the Materials and Processes for Medical Devices Conference, S. Shrivastava (ed.), ASM International, 2003.

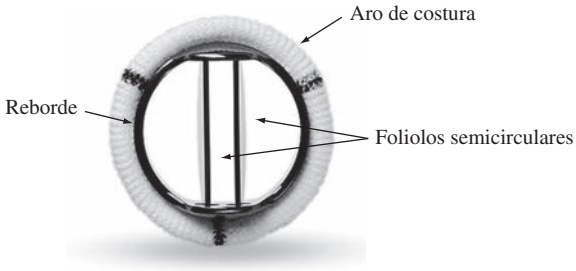


Figura 10.56
Válvula cardíaca artificial.
(http://www.me.utexas.edu/~uer/heartvalves/mechanics.html. Cortesía de St. Jude Medical, Inc.)

les con los que se puede hacer esta conexión. Los foliolos permiten el flujo de la sangre en la posición que se muestra en la figura, y en posición cerrada obstruyen dicho flujo (aunque no por completo). La coagulación de la sangre, que es un efecto colateral indeseable, se presenta debido a la interacción de los glóbulos rojos de la sangre con la válvula artificial. Los pacientes con válvulas cardíacas artificiales deben usar anticoagulantes para evitar la coagulación de la sangre.

Los injertos vasculares se usan en operaciones de derivación coronaria para desviar el flujo sanguíneo de arterias severamente obstruidas. Estos injertos vasculares pueden ser de tejidos naturales o artificiales. Los injertos artificiales deben tener alta resistencia a la tensión y resistir las oclusiones (taponamientos) de la arteria causadas por trombosis (coagulación sanguínea). El teflón o el dacrón se usan para esta aplicación. Sin embargo, el teflón tiene mejor desempeño contra la oclusión porque minimiza los esfuerzos cortantes que actúan sobre las células sanguíneas.

Los oxigenadores sanguíneos se diseñan para eliminar el dióxido de carbono de la sangre y suministrarle oxígeno. La sangre del lado derecho del corazón (no oxigenada) es bombeada a través de esos oxigenadores para producir sangre oxigenada y restituirla el cuerpo durante la cirugía de derivación cardiopulmonar.[12] Los oxigenadores son membranas de microporos *hidrofóbicas* (repelen el agua) hechas de materiales tales como el polipropileno (véase la sección 10.6.3). Puesto que el polipropileno es hidrofóbico, los poros se pueden llenar con gases, como O_2, en vez de agua. Durante esta operación, el aire fluye en uno de los lados de la membrana, mientras que la sangre fluye por el otro lado. El CO_2 se pierde por difusión a través de la membrana y el O_2 es absorbido desde los poros.

Los polímeros se utilizan también en corazones artificiales y dispositivos de apoyo cardíacos. Estos dispositivos son de importancia crítica y se usan en forma provisional a fin de mantener la salud del paciente en tanto se encuentra un donador de corazón. Sin los polímeros, estos dispositivos no funcionarían de manera eficiente.

10.12.2 Aplicaciones oftálmicas

Los polímeros son cruciales e irremplazables en aplicaciones oftálmicas (relacionadas con los ojos). Las funciones ópticas del ojo son corregidas por medio de anteojos, lentes de contacto (blandos y duros) e implantes intraoculares, y todos ellos están hechos principalmente de polímeros. Los lentes de contacto blandos están hechos de **hidrogel**, un material polimérico **hidrofílico** (afín al agua) que absorbe el agua y al hacerlo se hincha hasta un nivel específico. Los lentes blandos de hidrogel están hechos de polímeros y copolímeros con cierto grado de entrecruzamiento. Debido a su naturaleza blanda, los hidrogeles pueden adoptar la forma exacta de la córnea y permitir así un ajuste adecuado. Sin embargo, la córnea necesita oxígeno que únicamente se puede permear a través de los lentes. Los hidrogeles hidratados permiten un grado significativo de permeabilidad del oxígeno. El material original usado en esta aplicación era el poliHEMA (2-hidroxietil metacrilato), pero se han desarrollado otros nuevos polímeros con mejores técnicas de fabricación para producir lentes de contacto blandos más delgados.

Los lentes duros se colocan libremente sobre la córnea. Los lentes se flexionan con el parpadeo; el material de los lentes debe tener la propiedad de recuperar su forma rápidamente. Los lentes duros se fabricaban inicialmente de PMMA, que tiene ex-

[12] La cirugía se desarrolla sobre la arteria que va del corazón a los pulmones.

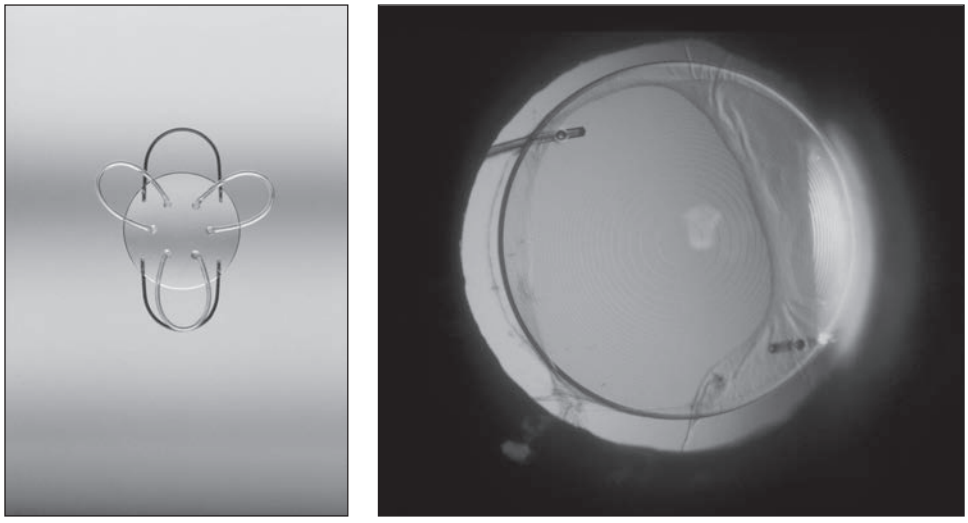


Figura 10.57
Un lente intraocular.
[*a) © Steve Allen/Photo Researchers, Inc. b) Chris Barry/Phototake).*]

celentes propiedades ópticas pero carece de permeabilidad al oxígeno. Para mejorar la permeabilidad del oxígeno, por ejemplo, para hacer lentes *rígidos permeables a gases* (RGP), se produjeron copolímeros de metacrilato de metilo con metacrilatos de siloxanilalquilo. Sin embargo, el siloxano es hidrofóbico. Para corregir esto se añadieron a la mezcla comonómeros hidrofílicos como el ácido metacrílico. En la actualidad, hay varios lentes de RGP disponibles comercialmente y la investigación prosigue para mejorar estos materiales en el futuro.

El tratamiento de afecciones tales como la catarata (turbiedad del lente ocular debida al exceso de células muertas) requiere cirugía y la remoción del lente opaca del ojo, y su subsecuente reemplazo con implantes de lentes intraoculares. Los lentes intraoculares consisten en un lente y táctiles (brazos laterales) (figura 10.57), que son necesarios para unir las lentes a los ligamentos de suspensión a fin de mantener los lentes en su lugar. Sin duda, el requisito de los materiales para lentes intraoculares es que tengan propiedades ópticas y de biocompatibilidad adecuadas. Al igual que con los lentes duros, tanto la porción óptica como los brazos laterales de la mayoría de los lentes intraoculares están hechos de PMMA. En la figura 10.58*a* se simula la visión de un paciente con catarata, y en la figura 10.58*b* se simula la visión del mismo paciente después de la cirugía. Las imágenes muestran la importancia de la ciencia e ingeniería de materiales en el mejoramiento de la calidad de vida.

10.12.3 Sistemas de administración de medicamentos

Los polímeros biodegradables, como el *ácido poliláctico* (PLA) y el *ácido poliglicólico* (PGA) y sus copolímeros, se usan en sistemas de implantes para la administración de medicamentos. La matriz de polímero (recipiente del polímero) contiene el medicamento y es implantada en el lugar deseado del cuerpo. A medida que el polímero

a) *b*)

Figura 10.58
Visión simulada de un paciente *a*) antes y *b*) después de la cirugía de catarata.
(© Royalty-Free/Corbis)

biodegradable se degrada, va liberando el medicamento. Esos sistemas de dosificación son especialmente importantes si la administración del medicamento en forma de píldoras o inyecciones no es posible por el efecto adverso del mismo en otros órganos o tejidos del cuerpo.

10.12.4 Materiales de sutura

Las suturas se usan para cerrar heridas e incisiones. Está claro que los materiales de sutura deben poseer 1) suficiente resistencia a la tensión para cerrar las heridas y 2) alta resistencia de los nudos contra los tirones, para mantener la carga en la sutura después de cerrar. Las suturas pueden ser absorbibles o no absorbibles. Las suturas no absorbibles se fabrican generalmente de polipropileno, nailon, tetraftalato de polietileno y polietileno. Dichas suturas permanecen intactas por un periodo indefinido cuando se colocan en el cuerpo. Las suturas absorbibles están hechas de ácido poliglicólico, que es biodegradable.

10.12.5 Aplicaciones ortopédicas

La principal aplicación ortopédica de los polímeros es en primer lugar como cemento de huesos y prótesis de articulaciones. El cemento para huesos se usa como material estructural para rellenar el espacio entre el implante y el hueso a fin de asegurar condiciones de carga más uniformes. Por tanto, el término *cemento óseo* no se debe interpretar como si se tratara de una función adhesiva. Para hacer más efectiva la microporosidad del cemento óseo, el endurecimiento debe mantenerse en un valor mínimo. Esto se logra aplicando técnicas de centrifugado y vacío cuando se prepara el cemento. A veces, el cemento óseo se usa también para corregir diversos defectos en los huesos. El principal material polimérico que se usa como cemento óseo es el PMMA. Las propiedades del PMMA a la tensión y la fatiga son importantes y se pueden mejorar añadiendo otros agentes. Los requisitos de aplicación exigen una resistencia mínima a la compresión de 70 MPa (10 Ksi) después del endurecimiento.

Como se dijo en el capítulo 1, una ventaja de los materiales poliméricos es que se pueden diseñar y sintetizar diversas mezclas de ellos para lograr los objetivos y requerimientos deseados. Ésta es una ventaja muy poderosa y se ha evidenciado en las aplicaciones antes mencionadas. El futuro de los materiales poliméricos como los biomateriales está en la ingeniería de tejidos. Por ejemplo, los investigadores estudian el uso de polímeros biodegradables como andamiajes para la generación de nuevos tejidos. Los polímeros biodegradables, como el PGA, se pueden implantar como andamiajes junto con células y proteínas promotoras del crecimiento, para estimular la generación del tejido. Por tanto, es factible que en el futuro se puedan regenerar tejidos dañados, ya sea *in vivo* (dentro del cuerpo) como en los casos de reparación de cartílago, o *in vitro* (fuera del cuerpo) para casos como los de reparación y reemplazo de piel.

10.13 R E S U M E N

Los plásticos y los elastómeros son importantes materiales de ingeniería principalmente por su amplio rango de propiedades, la relativa facilidad con que pueden moldearse en las formas deseadas y su costo relativamente bajo. Los materiales plásticos se pueden dividir por conveniencia en dos clases: *termoplásticos* y *plásticos termoendurecibles (termoestables).* Los termoplásticos requieren calor para darles forma y después de ser enfriados conservan la forma que se les ha dado. Estos materiales se pueden volver a calentar y usar de nuevo repetidamente. Los plásticos termofijos son moldeados generalmente en su forma permanente por medio de calor y presión, y durante ese tiempo se lleva a cabo una reacción química que enlaza los átomos para que formen un sólido rígido. Sin embargo, algunas reacciones de fraguado ocurren a temperatura ambiente sin el uso de calor y presión. Los plásticos termofijos no pueden ser fundidos de nuevo después que se han "solidificado" o "fraguado", y bajo calentamiento a alta temperatura se degradan o descomponen.

Las sustancias químicas requeridas para producir un plástico se derivan principalmente del petróleo, el gas natural y el carbón. Los materiales plásticos se producen por la polimerización de muchas moléculas pequeñas, llamadas *monómeros*, para formar moléculas muy grandes llamadas *polímeros.* Los termoplásticos están compuestos de polímeros de cadenas moleculares largas y entre las cadenas hay fuerzas de enlace de tipo dipolar permanente secundario. Los plásticos termoestables están enlazados en forma covalente por medio de enlaces covalentes fuertes entre todos los átomos.

Los métodos más comunes que se usan en el procesado de los termoplásticos son el *moldeo por inyección*, la *extrusión* y el *moldeo por soplado*, mientras que los métodos más comúnmente usados para los plásticos termofijos son el *moldeo por compresión y transferencia* y la *fundición.*

Hay muchas familias de polímeros termoplásticos y termofijos. Algunos ejemplos de termoplásticos de uso general son el polietileno, el policloruro de vinilo, el polipropileno y el poliestireno. Ejemplos de plásticos para ingeniería son las poliamidas (nailon), el poliacetal, el policarbonato, los poliésteres saturados, el óxido de polifenileno y la polisulfona. (Obsérvese que la división de los termoplásticos en plásticos de uso general y plásticos de ingeniería, es arbitraria.) Ejemplos de plásticos termofijos son los fenólicos, los poliésteres insaturados, las melaminas y los epóxicos.

Los *elastómeros* o *cauchos* constituyen una gran subdivisión de materiales poliméricos y tienen gran importancia para la ingeniería. El caucho natural se obtiene de plantaciones de árboles y aún tiene mucha demanda (cerca de 30 por ciento de la oferta mundial de caucho) debido a sus excelentes propiedades elásticas. Los cauchos sintéticos representan aproximadamente 70 por ciento del suministro de caucho mundial, siendo el más comúnmente usado el de tipo estireno-butadieno. Otros cauchos sintéticos, como el nitrilo y el

policloropreno (neopreno), se usan en aplicaciones donde se requieren propiedades especiales, como resistencia a los aceites y disolventes.

Los termoplásticos tienen una *temperatura de transición vítrea* por arriba de la cual se comportan como sólidos viscosos o sólidos ahulados, y por abajo de ella se comportan como sólidos frágiles parecidos al vidrio. Por arriba de la temperatura de transición vítrea se presenta una deformación permanente debido a que las cadenas moleculares se deslizan unas sobre otras, rompiendo enlaces secundarios y formándolos de nuevo. Los termoplásticos que se usan por arriba de la temperatura de transición vítrea se pueden reforzar con fuerzas de enlace intermoleculares usando átomos polares pendientes, como el cloro en el policloruro de vinilo, o mediante enlaces de hidrógeno como en el caso de los nailon. Los plásticos termoestables, debido a que tienen enlaces covalentes en su totalidad, permiten poca deformación antes de fracturarse.

La aplicación de los materiales poliméricos en el campo biomédico ha aumentado significativamente. Los polímeros se usan en aplicaciones cardiovasculares, oftálmicas, de administración de medicamentos y ortopédicas. Los polímeros son también el principal material que se utiliza como andamiaje biodegradable en el campo de la ingeniería de tejidos.

10.14 DEFINICIONES

Sección 10.1

Termoplástico (sustantivo): material plástico que debe ser calentado para darle forma (plástico) y que al enfriarse mantiene su forma. Los termoplásticos están compuestos de polímeros de cadena con enlaces de tipo dipolar permanente secundario entre las cadenas. Los termoplásticos pueden ablandarse repetidamente al ser calentados, y endurecerse cuando se enfrían. Los termoplásticos típicos son polietilenos, vinilos, acrílicos, celulósicos y nailon.

Plástico termofijo: material plástico que resulta de una reacción química por la acción de calor, catálisis, etc., lo cual da lugar a una estructura macromolecular reticular entrecruzada. Los plásticos termofijos no pueden ser fundidos y reprocesados de nuevo puesto que cuando se calientan se degradan y descomponen. Los plásticos termofijos típicos son los fenólicos, poliésteres insaturados y epóxicos.

Sección 10.2

Monómero: compuesto molecular simple que puede estar enlazado covalentemente para formar largas cadenas moleculares (polímeros). Por ejemplo: etileno.

Polímero de cadena: compuesto de alta masa molecular cuya estructura consta de un gran número de pequeñas unidades que se repiten llamadas *meros*. Los átomos de carbono forman la mayoría de los átomos de la cadena principal en la mayoría de los polímeros.

Mero: unidad que se repite en una cadena de la molécula de polímero.

Polimerización: reacción química en la cual se forman moléculas de alta masa molecular a partir de monómeros.

Copolimerización: reacción química en la cual las moléculas de alta masa molecular están formadas a partir de dos o más monómeros.

Polimerización en cadena: mecanismo de polimerización por el cual cada molécula de polímero aumenta de tamaño con rapidez una vez que el crecimiento comienza. Este tipo de reacción se presenta en tres pasos: 1) inicio de la cadena, 2) propagación de la cadena y 3) terminación de la cadena. El nombre implica una reacción en cadena y usualmente lo inicia una fuente externa. Ejemplo: la polimerización en cadena del etileno en polietileno.

Grado de polimerización: masa molecular de una cadena de polímero dividida entre la masa molecular de su mero.

Funcionalidad: número de sitios de enlace activo en un monómero. Si el monómero tiene dos sitios para enlazarse, se dice que es *bifuncional*.

Homopolímero: polímero que consta de un solo tipo de unidad monomérica.

Copolímero: cadena de polímero que consta de dos o más tipos de unidades monoméricas.

Enlace entrecruzado: formación de enlaces de valencia primarios entre las moléculas de la cadena del polímero. Cuando se presenta un extensivo enlace entrecruzado, como en el caso de las resinas termofijo, el entrecruzamiento produce una supermolécula de muchos átomos.

Polimerización sucesiva: mecanismo de polimerización por el cual el crecimiento de la molécula del polímero se lleva a cabo mediante una reacción intermolecular sucesiva. Solamente está involucrado un tipo de reacción. Las unidades de monómero pueden reaccionar entre sí o con moléculas del polímero de cualquier tamaño. Se supone que el grupo activo que está en el extremo de un monómero tiene la misma reactividad, sin importar cuál sea la longitud del polímero. Con frecuencia, en el proceso de polimerización se condensa un subproducto, como el agua. Ejemplo: la polimerización de nailon 6,6 a partir de ácido adípico y hexametilendiamina

Sección 10.3

Polimerización en masa: polimerización directa del monómero líquido a polímero en un sistema de reacción en el cual el polímero permanece soluble en su propio monómero.

Polimerización en solución: en este proceso se usa un disolvente que disuelve el monómero, el polímero y el iniciador de la polimerización. La dilución del monómero con el disolvente reduce la velocidad de polimerización, y el calor desprendido por la reacción de polimerización es absorbido por el disolvente.

Polimerización en suspensión: en este proceso se usa agua como medio de reacción y el monómero se dispersa en lugar de disolverse en el medio. Los productos de polímero se obtienen en forma de pequeñas perlas que son filtradas, lavadas y secadas para formar polvos de moldeo.

Sección 10.4

Cristalinidad (en polímeros): compactación de cadenas moleculares en una distribución estereorregular con alto grado de compactación. La cristalinidad de materiales poliméricos nunca es a 100 por ciento y se favorece en materiales poliméricos cuyas cadenas de polímeros son simétricas. Ejemplo: el polietileno de alta densidad puede ser 95 por ciento cristalino.

Temperatura de transición vítrea: centro del rango de temperaturas donde un termoplástico calentado cambia, después del enfriamiento, de un estado parecido a caucho o cuero al de un vidrio frágil.

Estereoisómeros: moléculas que tienen la misma composición química, pero diferente distribución estructural.

Estereoisómero atáctico: este isómero tiene grupos pendientes de átomos *dispuestos aleatoriamente* a lo largo de la cadena del polímero de vinilo. Ejemplo: polipropileno atáctico.

Isómero isotáctico: este isómero tiene grupos de átomos pendientes, todos del *mismo lado*, de una cadena de polímero de vinilo. Ejemplo: polipropileno isotáctico.

Isómero sindiotáctico: este isómero tiene grupos de átomos pendientes en posiciones *alternadas regularmente* a ambos lados de una cadena de polímero de vinilo. Ejemplo: polipropileno sindiotáctico.

Catalizador estereoespecífico: catalizador que crea en su mayor parte un tipo específico de estereoisómero durante la polimerización. Ejemplo: el catalizador Ziegler que se usa en la polimerización del propileno para convertirlo principalmente en el isómero de polipropileno isotáctico.

Sección 10.5

Moldeo por inyección: proceso de moldeo por medio del cual un material plástico reblandecido por calor se hace pasar a presión por un cilindro de tornillo sin fin hasta la cavidad de un molde relativamente enfriado que da al plástico la forma deseada.

Moldeo por soplado: método de fabricación de plásticos en el que un tubo hueco (bombillo) es forzado a tomar la forma de la cavidad de un molde mediante aire a presión aplicado en el interior.

Extrusión: operación en la cual un material plástico reblandecido es forzado a pasar a través de un orificio, produciéndose así un producto continuo. Ejemplo: la tubería de plástico es extruida.

Moldeo por compresión: proceso de moldeo en el cual el compuesto que se va a moldear (que generalmente ha sido calentado) se coloca primero en una cavidad del molde. Luego se cierra el molde y se aplican calor y presión hasta que el material se fragua.

Moldeo por transferencia: proceso para moldear un termofijo en el cual el compuesto que se va a moldear se reblandece primero por calentamiento en una cámara de transferencia y luego es empujado, bajo alta presión, al interior de una o varias cavidades del molde para su fraguado final.

Sección 10.6

Plastificantes: agentes químicos que se añaden a los compuestos plásticos para mejorar su flujo y procesado y para reducir su fragilidad. Ejemplo: policloruro de vinilo plastificado.

Carga: sustancia inerte de bajo costo que se añade a los plásticos para reducir su costo. Las cargas pueden mejorar también algunas propiedades físicas, tales como resistencia a la tensión, resistencia al impacto, dureza, resistencia al desgaste, etcétera.

Sección 10.9

Elastómero: material que a temperatura ambiente se alarga bajo un esfuerzo pequeño por lo menos al doble de su longitud, y recobra rápidamente casi su misma longitud original cuando el esfuerzo cesa.

***cis*-1,4 poliisopreno:** isómero de 1,4 poliisopreno que tiene el grupo metilo e hidrógeno del mismo lado del doble enlace central de su mero. El caucho natural está constituido principalmente por este isómero.

***trans*-1,4 poliisopreno:** isómero de 1,4 poliisopreno que tiene el grupo metilo e hidrógeno en lados opuestos al doble enlace central de su mero.

Vulcanización: reacción química que produce cadenas de polímero con enlaces entrecruzados. La vulcanización se refiere generalmente al entrecruzamiento de las cadenas moleculares de caucho con azufre, pero la palabra se usa también para designar otras reacciones de entrecruzamiento de polímeros, como las que se llevan a cabo en algunos cauchos de silicona.

Sección 10.12

Polímero biodegradable: tipo de polímero que es absorbido por el cuerpo humano una vez que ha cumplido su propósito; por ejemplo, las suturas absorbibles.

Biopolímero: polímeros que se usan dentro del cuerpo humano para diversas aplicaciones quirúrgicas.

Hidrogel: material polimérico blando que absorbe agua y se hincha hasta un nivel específico.

Polímero hidrofílico: polímero que absorbe agua; afín al agua.

10.15 PROBLEMAS

Problemas de cálculo

Las respuestas a los problemas marcados con un asterisco se encuentran al final del libro.

***10.1** Un polietileno de alto peso molecular tiene un peso molecular promedio de 410 000 g/mol. ¿Cuál es su grado de polimerización promedio?

10.2 Si un tipo de polímero tiene un grado de polimerización promedio de 10 000, ¿cuál es su peso molecular promedio?

10.3 Un nailon 6,6 tiene un peso molecular promedio de 12 000 g/mol. Calcule el grado de polimerización promedio (consulte la sección 10.7 para ver la estructura del mero). Peso molecular = 226 g/mol.

***10.4** Un material de policarbonato moldeado por inyección tiene un peso molecular promedio de 25 000 g/mol. Calcule su grado de polimerización (consulte la sección 10.7 para ver la estructura del mero del policarbonato). Peso molecular = 254 g/mol.

10.5 Calcule el peso molecular promedio M_m de un termoplástico que tiene las siguientes fracciones en peso f_i para los rangos de peso molecular que aparecen en la lista:

Rango de peso molecular (g/mol)	f_i	Rango de peso molecular (g/mol)	f_i
0-5 000	0.01	20 000-25 000	0.19
5 000-10 000	0.04	25 000-30 000	0.21
10 000-15 000	0.16	30 000-35 000	0.15
15 000-20 000	0.17	35 000-40 000	0.07

***10.6** Un copolímero está constituido por 70% en peso por poliestireno y 30% en peso por poliacrilonitrilo. Calcule la fracción mol de cada componente en este material.

***10.7** Un copolímero ABS está constituido por 25% en peso por poliacrilonitrilo, 30% en peso por polibutadieno y 45% en peso por poliestireno. Calcule la fracción mol de cada componente en este material.

10.8 Determine la fracción mol del policloruro de vinilo y del poliacetato de vinilo en un copolímero que tiene un peso molecular de 11 000 g/mol y un grado de polimerización de 150.

***10.9** ¿Cuánto azufre se debe añadir a 70 g de caucho de butadieno para que se entrecruce 3.0 por ciento de los meros? (Suponga que todo el azufre se usa para los enlaces entrecruzados de los meros y que solamente un átomo de azufre toma parte en cada enlace de entrecruzamiento).

10.10 Si se añaden 5 g de azufre a 90 g de caucho de butadieno, ¿cuál es la fracción máxima de los sitios de entrecruzamiento que pueden conectarse?

10.11 ¿Cuánto azufre se debe añadir para que se entrecruce 10 por ciento de los sitios de entrecruzamiento en 90 g de caucho poliisopreno?

10.12 ¿Cuántos kilogramos de azufre se requieren para que se entrecruce 15 por ciento de los sitios de entrecruzamiento en 200 kg de caucho de poliisopreno?

***10.13** Si se añaden 3 kg de azufre a 300 kg de caucho de butadieno, ¿qué fracción de los entrecruzamientos estará unida?

10.14 Un caucho de butadieno-estireno se fabrica por medio de la polimerización de un monómero de estireno con 7 monómeros de butadieno. Si 20 por ciento de los sitios de entrecruzamiento se van a enlazar con azufre, ¿qué porcentaje en peso de azufre se requiere? (Véase el problema de ejemplo 10.7.)

10.15 ¿Qué porcentaje en peso de azufre se debe añadir al polibutadieno para provocar un entrecruzamiento de 20 por ciento de los posibles sitios de entrecruzamiento?

10.16 Un caucho de butadieno-acrilonitrilo se fabrica por medio de la polimerización de un monómero de acrilonitrilo con 5 monómeros de butadieno. ¿Cuánto azufre se requiere para que reaccione con 200 kg de este caucho a fin de entrecruzar 22 por ciento de los sitios de entrecruzamiento? (Véase el problema de ejemplo 10.8.)

***10.17** Si 15 por ciento de los sitios de entrecruzamiento en caucho de isopropeno se van a enlazar, ¿qué porcentaje en peso de azufre debe contener el caucho?

***10.18** Se aplica un esfuerzo de 9.0 MPa a un material elastomérico a una fuerza constante a 20°C. Después de 25 días, el esfuerzo disminuye a 6.0 MPa. *a*) ¿Cuál es el tiempo de relajación τ para este material? *b*) ¿Cuál será el esfuerzo después de 50 días?

10.19 Un material polimérico tiene un tiempo de relajación de 60 días a 27°C cuando se le aplica un esfuerzo de 7.0 MPa. ¿Cuántos días se requieren para que el esfuerzo disminuya a 6.0 MPa?

***10.20** Se aplica esfuerzo de 1 000 psi a un elastómero a 27°C, y después de 25 días el esfuerzo se reduce a 750 psi a causa de la relajación del esfuerzo. Si la temperatura se eleva 50°C, el esfuerzo se reduce de 1 100 a 400 psi en 30 días. Calcule la energía de activación para este proceso de relajación usando una ecuación de relación tipo Arrhenius.

10.21 El esfuerzo sobre una muestra de material de caucho a deformación constante a 27°C disminuye de 6.0 a 4.0 MPa en tres días. *a*) ¿Cuál es el tiempo de relajación τ para este material? *b*) ¿Cuál será el esfuerzo sobre este material después de *i*) 15 días y *ii*) 40 días?

***10.22** Un material polimérico tiene un tiempo de relajación de 100 días a 27°C cuando se aplica un esfuerzo de 6.0 MPa. *a*) ¿Cuántos días se requieren para que el esfuerzo disminuya a 4.2 MPa? *b*) ¿Cuál es el tiempo de relajación a 40°C si la energía de activación para este proceso es de 25 kJ/mol?

Problemas de estudio

10.23 Defina los materiales poliméricos *a*) plásticos y *b*) elastómeros.

10.24 Defina un termoplástico.

10.25 Describa el arreglo estructural atómico de los termoplásticos.

10.26 ¿Qué tipos de átomos se enlazan entre sí en las cadenas moleculares termoplásticas? ¿Cuáles son las valencias de estos átomos en las cadenas moleculares?

10.27 ¿Qué es un átomo o un grupo de átomos pendientes?

10.28 ¿Qué tipo de enlace existe dentro de las cadenas moleculares de los termoplásticos?

10.29 ¿Qué tipo de enlace existe entre las cadenas moleculares de termoplásticos?

10.30 Defina los plásticos termofijos.

10.31 Describa el arreglo estructural atómico de los plásticos termofijos.

10.32 ¿Cuáles son algunas de las razones del gran incremento en el uso de plásticos en los diseños de ingeniería en los últimos años?

10.33 ¿Cuáles son algunas ventajas de los plásticos cuando se usan en los diseños de ingeniería mecánica?

10.34 ¿Cuáles son algunas ventajas de los plásticos cuando se usan en los diseños de ingeniería eléctrica?

10.35 ¿Cuáles son algunas ventajas de los plásticos cuando se usan en los diseños de ingeniería química?

10.36 Defina los siguientes términos: polimerización en cadena, monómero y polímero.

10.37 Describa la estructura de los enlaces entre una molécula de etileno, empleando *a*) la notación cruzada electrón-punto y *b*) la notación de guiones para los electrones de enlace.

10.38 ¿Cuál es la diferencia entre una molécula saturada que contiene carbono, y una no saturada, que también contiene carbono?

10.39 Describa la estructura de enlaces de una molécula de etileno activada que está lista para enlazarse en forma covalente con otra molécula activada, empleando *a*) la notación cruzada electrón-punto y *b*) la notación de guiones para los electrones de enlace.

10.40 Escriba una reacción química general para la polimerización en cadena del monómero etileno a fin de formar un polímero lineal de polietileno.

10.41 ¿Cuál es el nombre de la unidad química que se repite en una cadena de polímeros? ¿Cuál es la unidad química que se repite en el polietileno?

10.42 Defina el grado de polimerización de una cadena de polímero.

10.43 ¿Cuáles son las tres principales reacciones que ocurren durante la polimerización en cadena?

10.44 ¿Qué es un radical libre? Escriba una ecuación química para la formación de dos radicales libres a partir de una molécula de peróxido de hidrógeno, empleando *a*) la notación electrón-punto y *b*) la notación de guiones para los electrones de enlace.

10.45 Escriba una ecuación para la formación de dos radicales libres a partir de una molécula de peróxido de benzoilo empleando la notación de guiones para los electrones de enlace.

10.46 Escriba una ecuación para la reacción de un radical libre orgánico ($RO^{\bullet}$) con una molécula de etileno para formar un nuevo radical libre de cadena larga.

10.47 ¿Cuál es la función del iniciador para la polimerización en cadena?

10.48 Escriba una reacción para el radical libre $R—CH_2—CH_2$ con una molécula de etileno para extender el radical libre. ¿Qué tipo de reacción es ésta?

10.49 ¿Cómo es posible que una cadena polimérica, como un polietileno, siga creciendo espontáneamente durante la polimerización?

10.50 ¿Cuáles son dos métodos por medio de los cuales una reacción de polimerización lineal en cadena puede finalizar?

10.51 ¿Por qué se debe considerar el grado de polimerización *promedio* y el peso molecular *promedio* de un material termoplástico?

10.52 Defina el peso molecular promedio de un termoplástico.

10.53 ¿Cuál es la funcionalidad de un polímero? Distinga entre un monómero bifuncional y uno trifuncional.

10.54 ¿Cuál es la causa de que la cadena molecular de polietileno tenga una distribución en zigzag?

10.55 ¿Qué tipo de enlace químico se forma entre las cadenas de polímero en el polietileno?

10.56 ¿De qué manera las ramas laterales ubicadas en las cadenas principales de polietileno afectan el empacamiento de las cadenas moleculares en un polímero sólido? ¿Cómo afectan las ramificaciones de las cadenas del polímero la resistencia a la tensión del polietileno sólido producido en masa?

10.57 Escriba una reacción general para la polimerización de un polímero tipo vinilo.

10.58 Escriba las fórmulas estructurales para los meros de los siguientes polímeros de vinilo: *a*) polietileno, *b*) policloruro de vinilo, *c*) polipropileno, *d*) poliestireno, *e*) poliacrilonitrilo y *f*) poliacetato de vinilo.

10.59 Escriba una reacción general para la polimerización de un polímero de vinilideno.

10.60 Escriba fórmulas estructurales para los meros de los siguientes polímeros de vinilideno: *a*) cloruro de polivinilideno y *b*) metacrilato de polimetilo.

10.61 Distinga entre un homopolímero y un copolímero.

10.62 Ilustre los siguientes tipos de copolímeros empleando círculos llenos y abiertos para representar sus meros: *a*) aleatorio, *b*) alternado, *c*) en bloque y *d*) injerto.

10.63 Escriba una reacción de polimerización general para la formación de un copolímero de cloruro de vinilo y de acetato de vinilo.

10.64 Defina la polimerización por pasos de polímeros lineales. ¿Qué subproductos se producen comúnmente en la polimerización por pasos?

10.65 Escriba la ecuación para la reacción de una molécula de hexametilendiamina con una de ácido adípico para producir una molécula de nailon 6,6. ¿Cuál es el subproducto de esta reacción?

10.66 Escriba la reacción para la polimerización por pasos de dos moléculas de fenol con una de formaldehído para producir una molécula de fenol formaldehído.

10.67 ¿Qué tipo de subproducto se genera en esta reacción?

10.68 ¿Cuáles son las tres materias primas básicas que se usan para producir los compuestos químicos básicos necesarios para la polimerización de materiales plásticos?

10.69 Describa e ilustre los siguientes procesos de polimerización: *a*) en masa, *b*) solución, *c*) suspensión y *d*) emulsión.

10.70 ¿En qué proceso de polimerización el calor desprendido por la reacción es absorbido por el agua? ¿En qué proceso el calor es absorbido por el disolvente? ¿Qué proceso se usa cuando el calor de reacción de polimerización es bajo?

10.71 Describa el proceso Unipol para producir polietileno de baja densidad. ¿Cuáles son las ventajas de este proceso?

10.72 Durante la solidificación de los termoplásticos, ¿qué diferencias hay entre las gráficas de volumen específico *versus* temperatura de termoplásticos no cristalinos y parcialmente cristalinos?

10.73 Defina la temperatura de transición vítrea T_g para un termoplástico.

10.74 ¿Cuáles son los valores medidos de T_g para *a*) polietileno, *b*) policloruro de vinilo y *c*) polimetilmetacrilato? ¿Los valores T_g son constantes del material?

10.75 Describa e ilustre los modelos de flecos micelares y de cadena plegada para la estructura de los termoplásticos parcialmente cristalinos.

10.76 Describa la estructura de esferulitas encontrada en algunos termoplásticos parcialmente cristalinos.

10.77 ¿Por qué es imposible la cristalinidad completa en los termoplásticos?

10.78 ¿Cómo afecta la cantidad de cristalinidad de un termoplástico *a*) su densidad y *b*) su resistencia a la tensión? Explique.

10.79 ¿Qué son los estereoisómeros con respecto a las moléculas químicas?

10.80 Describa y dibuje modelos estructurales para los siguientes estereoisómeros de polipropileno: *a*) atáctico, *b*) isotáctico y *c*) sindiotáctico.

10.81 ¿Qué es un catalizador estereoespecífico? ¿Cómo afectó el desarrollo de un catalizador estereoespecífico para la polimerización del polipropileno la utilidad del polipropileno comercial?

10.82 En general, ¿en qué difiere el procesado de los termoplásticos para darles la forma deseada, del procesado de los plásticos termofijos?

10.83 Describa el proceso de moldeo por inyección para los termoplásticos.

10.84 Describa la operación de la máquina de moldeo por inyección de tornillo sin fin.

10.85 ¿Cuáles son las ventajas y desventajas del proceso de moldeo por inyección para el moldeo de los termoplásticos?

10.86 ¿Cuáles son las ventajas de la máquina de moldeo por inyección de mono husillo sobre el tipo antiguo de émbolo?

10.87 Describa el proceso de extrusión para el procesado de termoplásticos.

10.88 Describa los procesos de moldeo por soplado y de termoformación para dar forma a los termoplásticos.

10.89 Describa el proceso de moldeo por compresión para plásticos termofijos.

10.90 ¿Cuáles son las ventajas y desventajas del proceso de moldeo por compresión?

10.91 Describa el proceso de moldeo por transferencia para plásticos termofijos.

10.92 ¿Cuáles son algunas ventajas y desventajas del proceso de moldeo por transferencia?

10.93 ¿Cuáles son los cuatro principales materiales termoplásticos que se incluyen en casi 60 por ciento del tonelaje de ventas de materiales plásticos en Estados Unidos? ¿Cuáles eran sus precios por libra en 1988? ¿Y en el año 2000?

10.94 ¿En qué difiere la estructura de cadena molecular de los siguientes tipos de polietileno: *a*) baja densidad, *b*) alta densidad y *c*) lineal de baja densidad?

10.95 ¿Cómo afecta la ramificación en cadena las siguientes propiedades del polietileno: *a*) cantidad de cristalinidad, *b*) resistencia y *c*) elongación?

10.96 ¿Cuáles son algunas propiedades que hacen del polietileno un material plástico tan importante en la industria?

10.97 ¿Cuáles son algunas aplicaciones industriales del polietileno?

10.98 Escriba la reacción general de la polimerización del cloruro de vinilo.

10.99 ¿Cómo se puede explicar que la resistencia del policloruro de vinilo sea más alta que la del polietileno?

10.100 ¿Cómo se incrementa la flexibilidad del policloruro de vinilo producido por polimerización en masa?

10.101 ¿Cuáles son algunas propiedades del policloruro de vinilo que hacen de él un material industrial importante?

10.102 ¿Qué son los plastificantes? ¿Por qué se usan en algunos materiales poliméricos? ¿Cómo afectan de ordinario los plastificantes la resistencia y la flexibilidad de los materiales poliméricos? ¿Qué tipos de plastificantes se usan comúnmente para el PVC?

10.103 ¿Cómo se mejoró el procesado del PVC para producir PVC rígido?

10.104 ¿Cuáles son algunas aplicaciones del PVC plastificado?

10.105 Escriba la reacción general de la polimerización del polipropileno a partir del gas propileno.

10.106 Por qué es tan importante el uso de un catalizador estereoespecífico en la polimerización del polipropileno?

10.107 ¿De qué manera la presencia de un grupo metilo en cada uno de los átomos de carbono de la cadena de polímero principal afecta la temperatura de transición vítrea de este material, si se compara con el polietileno?

10.108 ¿Cuáles son algunas propiedades del polipropileno que lo hacen un material industrialmente importante?

10.109 ¿Cuáles son algunas aplicaciones del polipropileno?

10.110 Escriba la reacción general de la polimerización de poliestireno a partir de estireno.

10.111 ¿Cuál es el efecto de la presencia del grupo fenilo en cada dos carbonos de la cadena principal sobre las propiedades de impacto del poliestireno?

10.112 ¿Cómo se puede mejorar la baja resistencia al impacto del poliestireno por medio de la copolimerización?

10.113 ¿Cuáles son algunas aplicaciones del poliestireno?

10.114 ¿Cuál es la unidad estructural química que se repite en el poliacrilonitrilo?

10.115 ¿Cuál es el efecto de la presencia del grupo nitrilo en uno de cada dos carbonos de las cadenas principales del polímero sobre la estructura molecular de poliacrilonitrilo?

10.116 ¿Qué propiedades especiales tienen las fibras de poliacrilonitrilo? ¿Cuáles son algunas aplicaciones del poliacrilonitrilo?

10.117 ¿Qué son las resinas SAN? ¿Qué propiedades deseables tienen los termoplásticos SAN? ¿Cuáles son algunas aplicaciones de los termoplásticos SAN?

10.118 ¿Qué significan las letras A, B y S en el termoplástico ABS?

10.119 ¿Por qué se dice a veces que el ABS es un terpolímero?

10.120 ¿Qué ventajas importantes, en cuanto a propiedades, aporta cada uno de los componentes del ABS?

10.121 Describa la estructura del ABS. ¿Cómo se pueden mejorar las propiedades al impacto del ABS?

10.122 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de los plásticos ABS?

10.123 ¿Cuál es la unidad estructural química que se repite en el polimetilmetacrilato? ¿Con qué nombres comerciales se conoce generalmente al PMMA?

10.124 ¿Cuáles son algunas propiedades importantes del PMMA que lo hacen un plástico de importancia industrial?

10.125 ¿Qué son los fluoroplásticos? ¿Cuáles son las unidades estructurales químicas que se repiten en el politetrafluoroetileno y el policlorotrifluoroetileno?

10.126 ¿Cuáles son algunas propiedades y aplicaciones importantes del politetrafluoroetileno?

10.127 ¿Cómo se modifica la cristalinidad y la facilidad de moldeo del politetrafluoroetileno con la presencia del átomo de cloro en uno de cada dos átomos de carbono de la cadena del policlorotrifluoroetileno?

10.128 ¿Cuáles son algunas propiedades y aplicaciones importantes del policlorotrifluoroetileno?

10.129 Defina un termoplástico de ingeniería. ¿Por qué es arbitraria esta definición?

10.130 ¿Cómo se comparan los precios de los termoplásticos de ingeniería con los de plásticos comerciales como el polietileno, el policloruro de vinilo y el polipropileno?

10.131 ¿Cómo se comparan las densidades y resistencias a la tensión de los termoplásticos de ingeniería con las del polietileno y del policloruro de vinilo?

10.132 ¿Cuál es la fórmula estructural del enlace amida en los termoplásticos? ¿Cuál es el nombre general de los termoplásticos de poliamida?

10.133 Escriba una reacción química de una molécula de un ácido dibásico con una diamina para formar un enlace amida. ¿Cuál es el subproducto de esta reacción?

10.134 En la designación nailon 6,6, ¿qué significa el 6,6?

10.135 Escriba una reacción química de una molécula de ácido adípico y una molécula de hexametilendiamina para formar un enlace amida.

10.136 ¿Cuál es la unidad estructural que se repite en el nailon 6,6?

10.137 ¿Cómo se pueden sintetizar los nailon 6,9, 6,10 y 6,12?

10.138 Escriba la reacción de la polimerización del nailon 6 a partir de ϵ-caprolactama.

10.139 Ilustre el enlace entre las cadenas de polímero de nailon 6,6. ¿Por qué es particularmente fuerte este enlace (véase la figura 10.35)?

10.140 ¿Qué propiedades de los nailon los hacen útiles para aplicaciones de ingeniería? ¿Cuál es una propiedad indeseable importante del nailon?

10.141 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de ingeniería de los nailon?

10.142 ¿Cuál es la unidad estructural química que se repite en los policarbonatos? ¿Cuál es el enlace carbonato? ¿Cuáles son los nombres comerciales comunes de los policarbonatos?

10.143 ¿Qué parte de la estructura del policarbonato hace que la molécula sea rígida? ¿Qué parte de la molécula de policarbonato le imparte flexibilidad molecular?

10.144 ¿Cuáles son algunas propiedades de los policarbonatos que los hacen útiles como termoplásticos de ingeniería?

10.145 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de ingeniería de los policarbonatos?

10.146 ¿Cuál es la unidad estructural química básica que se repite en las resinas que tienen como base el óxido de polifenileno? ¿Cuáles son los nombres comerciales de estas resinas?

10.147 ¿Qué parte de la estructura del óxido de polifenileno le imparte su resistencia relativamente alta? ¿Qué parte de su estructura le imparte su flexibilidad molecular?

10.148 ¿Cuáles son algunas propiedades de las resinas de óxido de polifenileno que las hacen importantes como termoplásticos de ingeniería?

10.149 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de ingeniería de las resinas de óxido de polifenileno?

10.150 ¿Cuál es la unidad estructural química que se repite en los termoplásticos de ingeniería del acetal de alto desempeño? ¿Cuáles son los dos tipos principales de acetales y cuáles son sus nombres comerciales?

10.151 ¿Qué parte de la estructura de los acetales les imparte su alta resistencia?

10.152 ¿Cuáles son algunas propiedades de los acetales que los hace importantes como termoplásticos de ingeniería?

10.153 ¿Qué ventaja sobresaliente, en materia de propiedades, tienen los acetales sobre los nailon?

10.154 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de ingeniería de los acetales?

10.155 ¿A qué tipos de materiales han reemplazado comúnmente los acetales?

10.156 ¿Cuáles son los dos poliésteres termoplásticos de ingeniería más importantes? ¿Cuáles son sus unidades químicas estructurales que se repiten?

10.157 ¿Cuál es la estructura química del enlace de éster?

10.158 ¿Qué parte de la estructura de los poliésteres termoplásticos les imparte rigidez? ¿Qué parte les aporta movilidad molecular?

10.159 ¿Cuáles son algunas propiedades de los poliésteres termoplásticos que los hacen importantes como termoplásticos de ingeniería?

10.160 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de los termoplásticos PBT en ingeniería?

10.161 ¿Cuál es la unidad estructural química que se repite en la polisulfona?

10.162 ¿Qué parte de la estructura de la polisulfona le imparte su alta resistencia? ¿Qué parte le aporta a la cadena flexibilidad y resistencia al impacto? ¿A qué parte se debe su alta estabilidad frente a la oxidación?

10.163 ¿Cuáles son algunas propiedades de la polisulfona que son importantes para diseños de ingeniería?

10.164 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de ingeniería de la polisulfona?

10.165 ¿Cuál es la unidad estructural química que se repite en el sulfuro de polifenileno? ¿Qué termoplástico de ingeniería tiene una estructura similar?

10.166 ¿Cuál es el nombre comercial del sulfuro de polifenileno?

10.167 ¿Qué parte de la estructura del PPS le imparte rigidez y resistencia? ¿A qué parte se debe su alta resistencia respecto a los compuestos químicos?
10.168 ¿Qué propiedades hacen que el PPS sea útil como termoplástico de ingeniería?
10.169 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de los PPS en ingeniería?
10.170 ¿Cuál es la estructura química de la polieterimida? ¿Cuál es su nombre comercial?
10.171 ¿Qué es el enlace imida?
10.172 ¿Cuál es la función del enlace éter en la polieterimida?
10.173 ¿Qué propiedades especiales tiene la polieterimida para *a*) diseños de ingeniería eléctrica y *b*) diseños de ingeniería mecánica?
10.174 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de la polieterimida?
10.175 ¿Qué son las aleaciones de polímero? ¿Qué diferencia hay entre su estructura y la de los copolímeros?
10.176 ¿Por qué son de gran importancia para aplicaciones de ingeniería las aleaciones de polímero?
10.177 ¿Qué tipo de aleación de polímero es *a*) el Xenoy 1 000, *b*) el Valox 815 y *c*) el Bayblend MC2 500?
10.178 ¿Cuáles son algunas ventajas de los plásticos termofijos para aplicaciones en diseños de ingeniería? ¿Cuál es la mayor desventaja de los termofijos que los termoplásticos no tienen?
10.179 ¿Cuáles son los principales métodos de procesado que se utilizan con los termofijos?
10.180 ¿Cuáles son los dos principales ingredientes de los compuestos moldeables termofijos?
10.181 ¿Cuáles son las principales ventajas de los plásticos fenólicos para aplicaciones industriales?
10.182 Usando fórmulas estructurales, escriba la reacción de fenol con formaldehído para formar una molécula de fenol-formaldehído (use dos moléculas de fenol y una molécula de formaldehído). ¿Qué tipo de molécula se desprende por condensación en la reacción?
10.183 ¿Por qué se usan grandes porcentajes de cargas en los compuestos fenólicos moldeables? ¿Qué tipos de cargas se usan y con qué propósito?
10.184 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de los compuestos fenólicos?
10.185 Escriba la fórmula estructural del grupo epoxi y la unidad que se repite en una resina epóxica comercial.
10.186 ¿Cuáles son dos tipos de sitios de reacción que están activos en los enlaces cruzados de las resinas epóxicas comerciales?
10.187 Escriba la reacción para los entrecruzamientos de dos moléculas epóxicas con etilendiamina.
10.188 ¿Cuáles son algunas ventajas de las resinas termofijas epóxicas? ¿Cuáles son algunas de sus aplicaciones?
10.189 ¿Cuál es la causa por la cual la resina de poliéster insaturada es "insaturada"?
10.190 ¿Cómo son los entrecruzamientos de los poliésteres lineales insaturados? Escriba una reacción química como fórmula estructural para ilustrar el entrecruzamiento de un poliéster insaturado.
10.191 ¿Cómo se refuerza la mayoría de los poliésteres insaturados?
10.192 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de los poliésteres reforzados?
10.193 ¿Qué son los elastómeros? ¿Cuáles son algunos materiales elastoméricos?
10.194 ¿De qué árbol se obtiene la mayor parte del caucho natural? ¿Qué países tienen grandes plantaciones de estos árboles?
10.195 ¿Qué es el látex de caucho? Describa brevemente cómo se produce el caucho natural a granel.

10.196 Escriba la fórmula del *cis*-1,4 poliisopreno. ¿Qué significa el prefijo *cis*-? ¿Cuál es el significado de 1,4 en el nombre *cis*-1,4 poliisopreno?

10.197 ¿De qué está hecho principalmente el caucho natural? ¿Qué otros componentes están presentes en el caucho natural?

10.198 ¿A qué arreglo estructural se atribuye el que se enrollen las cadenas de polímeros de caucho natural? ¿Qué es un impedimento estérico?

10.199 ¿Qué son los isómeros químicos estructurales?

10.200 ¿Qué es la gutapercha? ¿Cuál es la unidad estructural química que se repite en la gutapercha?

10.201 ¿A qué se refiere el prefijo *trans*- en el nombre *trans*-1,4 poliisopreno?

10.202 ¿Por qué el isómero trans es causa de un mayor grado de cristalinidad que el isómero cis del poliisopreno?

10.203 ¿En qué consiste el proceso de vulcanización del caucho natural? ¿Quién descubrió este proceso y cuándo? Ilustre el entrecruzamiento del *cis*-1,4 poliisopreno con átomos de azufre divalente.

10.204 ¿Cómo afecta el entrecruzamiento con azufre la resistencia a la tensión del caucho natural? ¿Por qué en el proceso se usa sólo, aproximadamente, 3% en peso de azufre?

10.205 ¿Qué materiales se usan en procesos de composición del caucho y cuál es la función de cada uno?

10.206 ¿Cómo pueden los átomos de oxígeno entrecruzar las moléculas de caucho? ¿Cómo se puede retardar el entrecruzamiento de moléculas de caucho por medio de átomos de oxígeno?

10.207 ¿Qué es el caucho estireno-butadieno? ¿Qué porcentaje en peso de éste es estireno? ¿Cuáles son las unidades estructurales químicas que se repiten en el SBR?

10.208 ¿Se puede vulcanizar el SBR? Explique.

10.209 ¿Cuáles son algunas ventajas y desventajas del SBR? ¿Y del caucho natural?

10.210 ¿Cuál es la composición de los cauchos de nitrilo? ¿Qué efecto tiene el grupo nitrilo sobre la cadena de carbono principal en el caucho de nitrilo?

10.211 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de los cauchos de nitrilo?

10.212 Escriba la unidad estructural química que se repite en el policloropreno. ¿Qué nombre común se da al caucho de policloropreno? ¿Cómo afecta la presencia del átomo de cloro en el policloropreno algunas de sus propiedades?

10.213 ¿Cómo se vulcanizan los materiales elastoméricos de policloropreno?

10.214 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de ingeniería de los cauchos de neopreno?

10.215 ¿Qué son las siliconas? ¿Cuál es la unidad estructural química que se repite en las siliconas?

10.216 ¿Qué es un elastómero de siliconas? ¿Cuál es la unidad química estructural que se repite en la mayoría de los tipos comunes de caucho de silicona? ¿Cuál es su nombre técnico?

10.217 ¿Cómo puede un caucho de silicona formar enlaces cruzados a temperatura ambiente?

10.218 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de ingeniería del caucho de silicona?

10.219 Describa el comportamiento general de deformación de un plástico termoplástico por arriba y por abajo de su temperatura de transición vítrea.

10.220 ¿Qué mecanismos de deformación intervienen durante la deformación elástica y plástica de los termoplásticos?

10.221 ¿Cómo influye la masa molecular promedio de un termoplástico en su resistencia?

10.222 ¿Cómo influye la cantidad de cristalinidad contenida en un material termoplástico sobre *a*) su resistencia, *b*) su módulo de elasticidad a la tensión y *c*) su densidad?

10.223 Explique por qué el polietileno de baja densidad es más débil que el polietileno de alta densidad.

10.224 Explique por qué los grupos laterales voluminosos refuerzan a los termoplásticos.

10.225 Explique por qué los átomos altamente polares enlazados a la cadena de carbono principal refuerzan a los termoplásticos. Cite ejemplos.

10.226 Explique cómo los átomos de oxígeno enlazados covalentemente a la cadena principal de carbono refuerzan a los termoplásticos. Dé un ejemplo.

10.227 Explique cómo los anillos de fenileno enlazados covalentemente a la cadena principal de carbono refuerzan a los termoplásticos. Dé un ejemplo.

10.228 Explique por qué los plásticos termofijos tienen en general resistencias más altas y ductilidades bajas.

10.229 ¿Cómo afecta un aumento de temperatura la resistencia de los termoplásticos? ¿Qué cambios se presentan en la estructura del enlace cuando los termoplásticos se calientan?

10.230 ¿Por qué los plásticos termofijos que no se fraguan se vuelven viscosos y fluyen a temperaturas elevadas?

10.231 ¿Cómo afectan los aumentos de esfuerzo y temperatura la resistencia a la fluencia de los termoplásticos?

10.232 ¿Qué es el comportamiento viscoelástico de los materiales plásticos?

10.233 Defina el módulo de fluencia de un material plástico.

10.234 ¿Cómo se puede incrementar el módulo de fluencia de un termoplástico?

10.235 ¿Cómo se puede explicar la energía adicional que se requiere para fracturar a los termoplásticos vítreos, en comparación con los vidrios inorgánicos?

10.236 ¿Qué es un agrietamiento en un termoplástico vítreo?

10.237 Describa la estructura de una grieta en un termoplástico.

10.238 Describa los cambios que ocurren en la estructura molecular durante la fractura dúctil de un termoplástico.

10.16 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. Seleccione el material para el forro aislante de un alambre conductor de cobre en un motor de automóvil. Este material estará expuesto a temperaturas que varían de −5°C a 120°C. El sistema debe ser capaz de adaptarse al entorno del motor (debe ser flexible). Use la tabla 10.2.

2. *a*) Mencione las propiedades que se requieren en un material para que sea seleccionado en el diseño y manufactura de una maleta grande de viaje. *b*) Proponga varios materiales posibles. *c*) Identifique su mejor elección y explique por qué la prefiere.

3. ¿Qué es un plástico autolubricante? Cite ejemplos. Mencione algunas aplicaciones específicas.

4. Un ingeniero ha seleccionado una resina epóxica, termofija, como candidato eficaz para una aplicación específica en condiciones de humedad y alta corrosión. Sin embargo, la baja resistencia o el bajo módulo de elasticidad de la resina epóxica es un problema potencial. ¿Puede usted proponer una solución para aumentar la resistencia de la resina epóxica?

5. Suponga que el nuevo reglamento de fabricación de automóviles dispone que las defensas de un auto deben soportar un impacto de 5 millas por hora sin que sufran daño alguno, ni ellas ni el vehículo. Diseñe un sistema para cumplir con esa disposición y seleccione el material para fabricar las defensas.

6. En una cirugía de reemplazo total de cadera, la cabeza del fémur se reemplaza con un componente metálico, generalmente una aleación de Co-Cr y la copa del acetábulo se reemplaza con polietileno de peso molecular muy alto (UHMWP). *a*) Cite razones por las cuales el UHMWP resulta adecuado para esta aplicación, en comparación con una copa metálica. *b*) Investigue la ventaja del UHMWP sobre el polietileno de baja densidad.

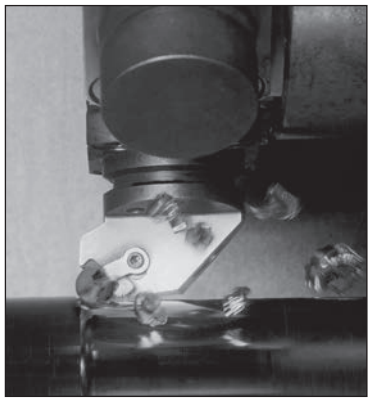
7. *a*) Al seleccionar los materiales para discos compactos, ¿qué factores debe usted considerar? *b*) ¿Qué material seleccionaría para esta aplicación?

8. *a*) Al seleccionar los materiales para guantes quirúrgicos, ¿qué factores debe tomar en cuenta? *b*) ¿Qué material seleccionaría para esta aplicación?

9. *a*) Al seleccionar materiales para tableros terminales y otro tipo de equipo de computadora para albergar los componentes electrónicos, ¿qué factores debe tomar en cuenta? *b*) ¿Qué material seleccionaría para estas aplicaciones?

CAPÍTULO

11 Cerámicas



(Cortesía de Kennametal)

Debido a sus características deseables como alta dureza, resistencia al desgaste, estabilidad química, resistencia a altas temperaturas y bajo coeficiente de expansión térmica, las cerámicas avanzadas han sido seleccionadas como el material más adecuado para múltiples aplicaciones. Entre éstas se incluyen, aunque no exclusivamente, el procesamiento de minerales, sellos, válvulas, intercambiadores de calor, troqueles para perfilar metales, motores adiabáticos diesel, turbinas de gas, productos médicos y herramientas de corte.

Las herramientas de corte hechas con cerámica tienen muchas ventajas sobre sus contrapartes metálicas convencionales; por ejemplo, estabilidad química, mayor resistencia al desgaste, más dureza ante el calor, y mejor dispersión de calor en el proceso de eliminación de rebabas. Algunos ejemplos de materiales cerámicos que se usan para fabricar herramientas de corte son los materiales compuestos óxido-metal (70% Al_2O_3-30% TiC), oxinitruros de silicio-aluminio (sialones) y nitruro de boro cúbico. Estas herramientas son manufacturadas en procesos pulvimetalúrgicos en los que las partículas de cerámica se densifican hasta darles forma final por compactación y sinterización. Las fotos con que inicia el capítulo son ejemplos de varios tipos de productos hechos de cerámicas avanzadas para sustituir metales.[1] ■

[1] *Ceramics Engineered Materials Handbook,* volumen 1, ASM International.

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Definir y clasificar los materiales cerámicos, incluso las cerámicas tradicionales y las de ingeniería.
2. Describir diversas estructuras cristalinas de cerámicas.
3. Describir el carbono y sus alótropos.
4. Describir varios métodos de procesamiento para las cerámicas.
5. Describir las propiedades mecánicas de las cerámicas y el mecanismo correspondiente de deformación, endurecimiento y falla de las cerámicas.
6. Describir las propiedades térmicas de las cerámicas.
7. Describir varios tipos de vidrios cerámicos, la temperatura de transición vítrea, los métodos de conformación y la estructura del vidrio.
8. Describir algunos recubrimientos y aplicaciones de las cerámicas.
9. Explicar el uso de materiales cerámicos en aplicaciones biomédicas y en nanotecnología.

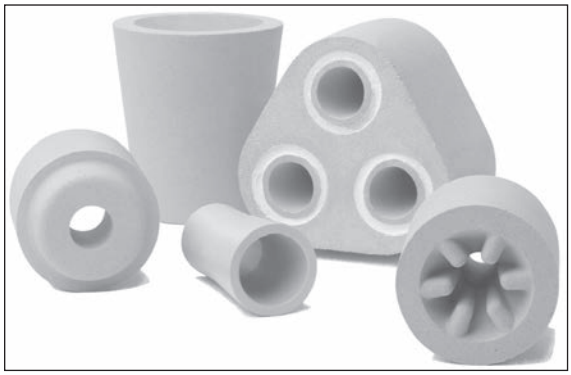
11.1 INTRODUCCIÓN

Los **materiales cerámicos** son inorgánicos, materiales no metálicos que constan de elementos metálicos y no metálicos enlazados entre sí principalmente por enlaces iónicos y/o enlaces covalentes. La composición química de los materiales cerámicos varía considerablemente, desde los compuestos simples hasta mezclas de muchas fases complejas enlazadas.

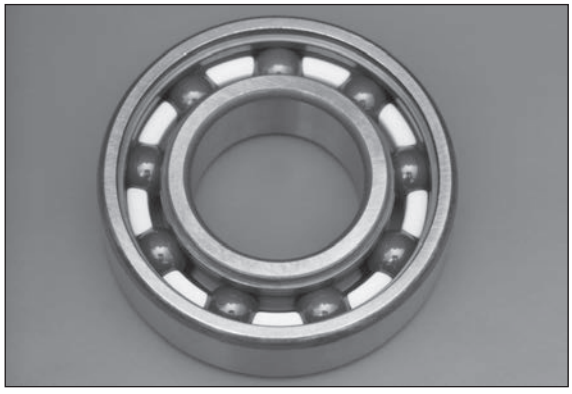
Las propiedades de los materiales cerámicos varían también enormemente, debido a diferencias en el enlace. En general, los materiales cerámicos son típicamente duros y frágiles, con tenacidad y ductilidad bajas. Los cerámicos son generalmente buenos aislantes eléctricos y térmicos debido a la ausencia de electrones de conducción. En general, los materiales cerámicos tienen temperaturas de fusión relativamente altas y gran estabilidad química en muchos ambientes hostiles, gracias a la estabilidad de sus enlaces fuertes. Por estas propiedades, los materiales cerámicos son indispensables en muchos diseños de ingeniería. Dos ejemplos de la importancia estratégica de los materiales cerámicos en la alta tecnología reciente se ilustran en la figura 11.1.

En general, los materiales cerámicos que se usan en aplicaciones de ingeniería se pueden dividir en dos grupos: los materiales cerámicos tradicionales y los materiales cerámicos de ingeniería. Distintivamente, la cerámica tradicional está hecha de tres componentes básicos: arcilla, sílice (sílex) y feldespato. Ejemplos de cerámicas tradicionales son los vidrios, ladrillos y azulejos que se usan en industrias de la construcción, y la porcelana eléctrica que se utiliza en la industria eléctrica. Las cerámicas de ingeniería, en cambio, consisten típicamente en compuestos puros o casi puros como óxido de aluminio (Al_2O_3), carburo de silicio (SiC) y nitruro de silicio (Si_3N_4). Ejemplos del uso de las cerámicas de ingeniería en alta tecnología son el carburo de silicio en las áreas de alta temperatura del motor de turbina de gas automotriz AGT-100 experimental y el óxido de aluminio como base de apoyo para chips de circuito integrado en un módulo de conducción térmica.

a)



b)



c)

Figura 11.1
a) Crisoles de zircoa (dióxido de circonio) que se usan en la fundición de superaleaciones. *b*) Línea de productos zircoa de grano grueso incluyendo boquillas, toberas, bloques refractarios de quemador, placas reguladoras y discos.
[a) y b) American Ceramic Bulletin, septiembre de 2001. Fotografía cortesía de Zircon, Inc.]
c) Cojinetes y anillos de bolas Ceratec de alto desempeño elaborados con titanio y suministros de nitruro de carbono mediante una tecnología a base de metal pulverizado.
(© Tom Pantages photo/cortesía Bearing Works.)

En este capítulo se examinarán primero algunas estructuras cristalinas de cerámicas sencillas y luego se estudiarán estructuras cerámicas de silicatos más complicadas. A continuación se explorarán varios métodos de procesamiento de materiales cerámicos y enseguida se estudiarán algunas propiedades mecánicas y térmicas de los materiales cerámicos. Se analizarán ciertos aspectos de la estructura y propiedades de vidrios, recubrimientos cerámicos y de superficie de ingeniería y el uso de materiales cerámicos en aplicaciones biomédicas. Finalmente se explorará la nanotecnología y los cerámicos.

11.2 ESTRUCTURAS CRISTALINAS DE CERÁMICAS SIMPLES

11.2.1 Enlace iónico y covalente en compuestos cerámicos simples

Se consideran primero algunas estructuras cristalinas de cerámicas simples. Varios compuestos cerámicos con estructuras cristalinas relativamente sencillas se listan en la tabla 11.1 con sus puntos de fusión.

En los compuestos cerámicos que aparecen en la lista, el enlace atómico es una mezcla de enlaces iónicos y covalentes. Los valores aproximados de los porcentajes del carácter iónico y covalente de los enlaces entre los átomos de estos compuestos se pueden obtener considerando las diferencias de la electronegatividad entre los diferentes tipos de átomos en los compuestos y usando la ecuación de Pauling para el porcentaje de carácter iónico (ecuación 2.10). En la tabla 11.2 se muestra que el porcentaje del carácter iónico o covalente varía considerablemente en compuestos cerámicos simples. La cantidad de enlace iónico o covalente entre los átomos de estos compues-

Tabla 11.1 Algunos compuestos de cerámicas simples y sus puntos de fusión

Compuesto cerámico	Fórmula	Punto de fusión (°C)	Compuesto cerámico	Fórmula	Punto de fusión (°C)
Carburo de hafnio	HfC	4 150	Carburo de boro	B_4C_3	2 450
Carburo de titanio	TiC	3 120	Óxido de aluminio	Al_2O_3	2 050
Carburo de tungsteno	WC	2 850	Dióxido de silicio†	SiO_2	1 715
Óxido de magnesio	MgO	2 798	Nitruro de silicio	Si_3N_4	1 700
Dióxido de circonio	ZrO_2*	2 750	Dióxido de titanio	TiO_2	1 605
Carburo de silicio	SiC	2 500			

*Se cree que cuando está fundido tiene una estructura cristalina de fluorita monoclínica (deformada).
†Cristobalita.

Tabla 11.2 Porcentaje de enlace iónico y covalente en algunos compuestos cerámicos

Compuesto cerámico	Enlace en átomos	Diferencia en electronegatividad	Carácter iónico %	Carácter covalente %
Dióxido de circonio, ZrO_2	Zr-O	2.3	73	27
Óxido de magnesio, MgO	Mg-O	2.2	69	31
Óxido de aluminio, Al_2O_3	Al-O	2.0	63	37
Dióxido de silicio, SiO_2	Si-O	1.7	51	49
Nitruro de silicio, Si_3N_4	Si-N	1.3	34.5	65.5
Carburo de silicio, SiC	Si-C	0.7	11	89

tos es importante porque determina, en cierta medida, qué tipo de estructura cristalina se formará en el compuesto cerámico a granel.

11.2.2 Distribuciones iónicas sencillas que se encuentran en sólidos enlazados iónicamente

En sólidos (cerámicos) iónicos el empaquetamiento de los iones está determinado principalmente por los siguientes factores:

1. El tamaño relativo de los iones en el sólido iónico (supóngase que los iones son esferas duras con radios definidos).

2. La necesidad de equilibrar las cargas electrostáticas para mantener una neutralidad eléctrica en el sólido iónico.

Cuando el enlace iónico entre átomos se presenta en el estado sólido, las energías de los átomos disminuyen debido a la formación de los iones y a su enlace en un sólido iónico. Los sólidos iónicos tienden a tener sus iones empacados tan densamente como es posible para disminuir, lo más que se pueda, la energía total del sólido. Las limitaciones para el empacamiento denso son los tamaños relativos de los iones y la necesidad de conservar una neutralidad de carga.

Limitaciones de tamaño para el empaquetamiento denso de iones en un sólido iónico Los sólidos iónicos constan de cationes y aniones. En el enlace iónico, algunos átomos pierden sus electrones exteriores para convertirse en *cationes* y otros ganan electrones externos para convertirse en *aniones.* Por tanto, los cationes son normalmente más pequeños que los aniones con los que se enlazan. El número de aniones que rodean a un catión central en un sólido iónico se denomina **número de coordinación** (**NC**) y corresponde al número de vecinos más próximos que rodean a un catión central. Por razones de estabilidad, el átomo central se rodea del mayor número posible de aniones. Sin embargo, los aniones tienen que hacer contacto con el catión central y se debe conservar la neutralidad de la carga.

En la figura 11.2 se muestran dos configuraciones estables para la coordinación de aniones alrededor de un catión central en un sólido iónico. Si los aniones no tocan el catión central, la estructura se vuelve inestable porque el catión central puede "vibrar en su jaula de aniones" (tercer diagrama de la figura 11.2). La razón del radio del catión central respecto al de los aniones circundantes se llama **razón de radios**,

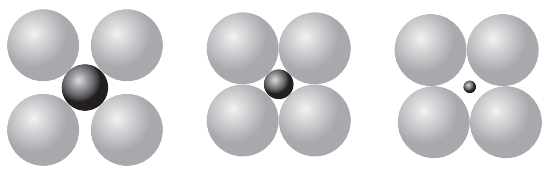


Figura 11.2
Configuraciones de coordinación, estables e inestables, para sólidos iónicos.
(W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", 2a. ed., Wiley, 1976.)

Disposición de iones alrededor del ion central	NC	Intervalo de razones de radio de catión respecto a radio de anión
Esquinas del cubo	8	≥0.732
Esquinas del octaedro	6	≥0.414
Esquinas del tetraedro	4	≥0.225
Esquinas del triángulo	3	≥0.155

NC = Número de coordinación

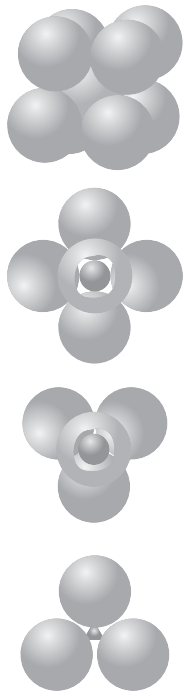


Figura 11.3
Razones de radios para números de coordinación de 8, 6, 4 y 3 aniones que rodean a un catión central en sólidos iónicos.
(W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", 2a. ed., Wiley, 1976.)

$r_{\text{catión}}/r_{\text{anión}}$. Cuando los aniones se tocan entre sí y hacen contacto con el catión central, la razón de radios se denomina **razón de radios crítica (mínima)**. Las razones de radio permisibles para sólidos iónicos con números de coordinación 3, 4, 6 y 8 aparecen en la lista de la figura 11.3 junto con ilustraciones que muestran las coordinaciones correspondientes.

PROBLEMA DE EJEMPLO 11.1

Calcule la razón de radios crítica (mínima) *r/R* para la coordinación triangular (NC = 3) de tres aniones de radio *R* que rodean a un catión central de radio *r* en un sólido iónico.

■ Solución

En la figura 11.4*a* se muestran tres aniones grandes de radio *R* que rodean y apenas tocan a un catión central de radio *R*. El triángulo *ABC* es equilátero (cada ángulo = 60°) y la línea

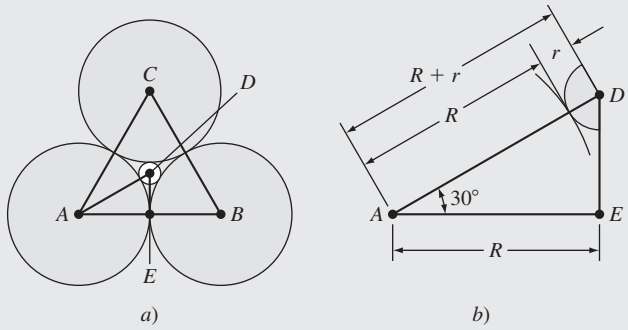


Figura 11.4
Diagrama de una coordinación triangular.

AD biseca el ángulo *CAB*. Por tanto, el ángulo $DAE = 30°$. Para hallar la relación entre R y r, se construye el triángulo *ADE* como se muestra en la figura 11.4*b*. Por tanto,

$$AD = R + r$$

$$\cos 30° = \frac{AE}{AD} = \frac{R}{R + r} = 0.866$$

$$R = 0.866(R + r) = 0.866R + 0.866r$$

$$0.866r = R - 0.866R = R(0.134)$$

$$\frac{r}{R} = 0.155 \blacktriangleleft$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 11.2

Prediga el número de coordinación para los sólidos iónicos CsCl y NaCl. Use los siguientes radios iónicos para su predicción:

$$Cs^+ = 0.170 \text{ nm} \qquad Na^+ = 0.102 \text{ nm} \qquad Cl^- = 0.181 \text{ nm}$$

■ Solución

La razón de radios para el CsCl es

$$\frac{r(Cs^+)}{R(Cl^-)} = \frac{0.170 \text{ nm}}{0.181 \text{ nm}} = 0.94$$

Puesto que esta razón es mayor que 0.732, el CsCl debería tener una coordinación cúbica (NC = 8), lo cual es cierto.

La razón de radios para el NaCl es

$$\frac{r(Na^+)}{R(Cl^-)} = \frac{0.102 \text{ nm}}{0.181 \text{ nm}} = 0.56$$

Como la razón es mayor que 0.414, pero menor que 0.732, el NaCl debería mostrar coordinación octaédrica (NC = 6), lo cual es cierto.

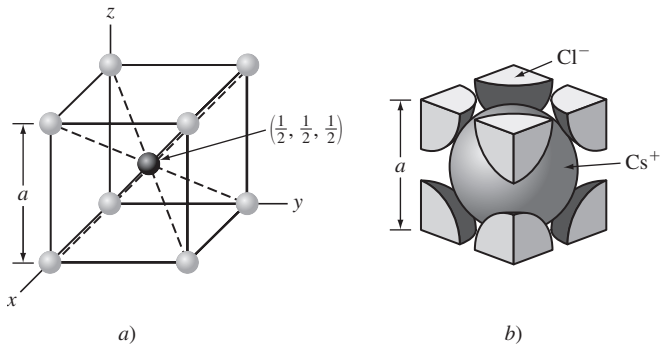


Figura 11.5
Celda unitaria de la estructura cristalina de cloruro de cesio (CsCl). *a*) Celda unitaria de espacio iónico. *b*) Celda unitaria de esfera rígida. En esta estructura cristalina, ocho iones de cloruro rodean a un catión central en coordinación cúbica (NC = 8). En esta celda unitaria hay un ion Cs^+ y un ion Cl^-.

MatVis

11.2.3 Estructura cristalina del cloruro de cesio (CsCl)

La fórmula química del cloruro de cesio sólido es CsCl, y en vista de que esta estructura se encuentra enlazada en forma principalmente iónica, hay igual número de iones Cs^+ y Cl^-. Debido a que la razón de radios para el CsCl es 0.94 (véase el problema de ejemplo 11.2), el cloruro de cesio tiene una coordinación cúbica (NC = 8), como se muestra en la figura 11.5. Así, ocho iones de cloruro rodean a un catión de cesio central en la posición $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ en la celda unitaria de CsCl. Los compuestos iónicos que también tienen la estructura cristalina del CsCl son CsBr, TlCl y TlBr. Los compuestos intermetálicos AgMg, LiMg, AlNi y $\beta-$Cu$-$Zn también tienen esta estructura. La estructura del CsCl no es de mucha importancia para los materiales cerámicos, pero ilustra cómo las razones de radios más elevadas conducen a números de coordinación más altos en estructuras cristalinas iónicas.

PROBLEMA DE EJEMPLO 11.3

Calcule el factor de empaquetamiento iónico para el CsCl. Los radios iónicos son Cs^+ = 0.170 nm y Cl^- 0.181 nm.

■ Solución

Los iones se tocan entre sí a través de la diagonal del cubo de la celda unitaria de CsCl, como se muestra en la figura 11.6. Sean r = ion Cs^+ y R = ion Cl^-. Por tanto

$$\sqrt{3}a = 2r + 2R$$
$$= 2(0.170 \text{ nm} + 0.181 \text{ nm})$$
$$a = 0.405 \text{ nm}$$

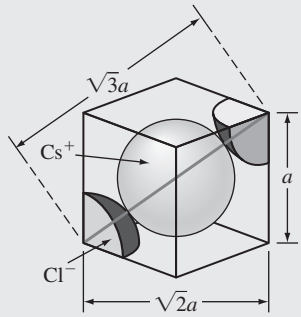


Figura 11.6

$$\text{Factor de empaquetamiento iónico de CsCl} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3(1\ Cs^+\ \text{ion}) + \frac{4}{3}\pi R^3(1\ Cl^-\ \text{ion})}{a^3}$$

$$= \frac{\frac{4}{3}\pi(0.170\ \text{nm})^3 + \frac{4}{3}\pi(0.181\ \text{nm})^3}{(0.405\ \text{nm})^3}$$

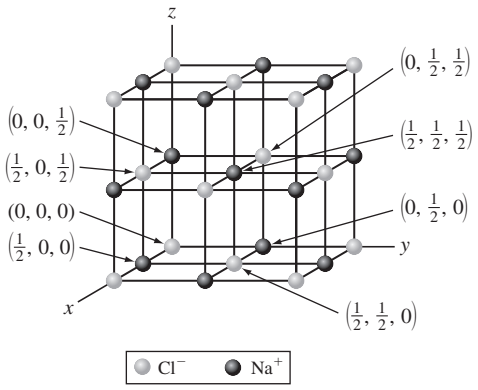
$$= 0.68 \blacktriangleleft$$

11.2.4 Estructura cristalina del cloruro de sodio (NaCl)

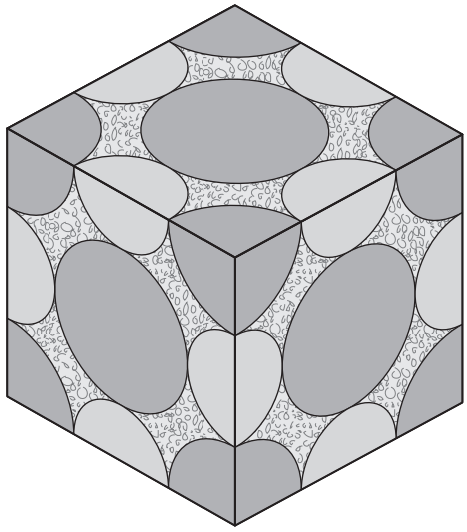
La estructura cristalina del cloruro de sodio, o sal de roca, está enlazado principalmente en forma iónica y su fórmula química es NaCl. Es por esto que se requiere igual número de iones Na^+ y Cl^- para conservar la neutralidad de carga. En la figura 11.7*a* se muestra una celda unitaria de NaCl de espacio reticular y en la figura 2.13*b*, un modelo de esfera rígida para la celda unitaria de NaCl. En la figura 11.7*a* se muestran aniones negativos Cl^- que ocupan los sitios atómicos reticulares FCC y cationes positivos Na^+ que ocupan los espacios intersticiales entre los sitios atómicos FCC. Los centros de los iones Na^+ y Cl^- ocupan las posiciones reticulares que se indican en la figura 11.7*a*:

$$\begin{array}{lcccc} Na^+: & (\frac{1}{2}, 0, 0) & (0, \frac{1}{2}, 0) & (0, 0, \frac{1}{2}) & (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \\ Cl^-: & (0, 0, 0) & (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0) & (\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}) & (0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \end{array}$$

Puesto que cada catión central de Na^+ está rodeado de seis aniones Cl^-, la estructura tiene una coordinación octaédrica (esto es, NC = 6), como se muestra en la figura 11.7*b*. Este tipo de coordinación se predice a partir del cálculo de la razón de radios de $r_{Na^+}/R_{Cl^-} = 0.102\ \text{nm}/0.181\ \text{nm} = 0.56$, que es mayor que 0.414 pero menor que 0.732. Otros ejemplos de compuestos cerámicos que tienen la estructura del NaCl son MgO, CaO, NiO y FeO.



a) *b*)



Estructura cristalina del cloruro de sodio
NaCl

(Gris claro) iones de sodio—(0.102 nm de radio) $\frac{r_{Na^+}}{R_{Cl^-}} = 0.56$
(Gris oscuro) iones de cloruro—(0.181 nm de radio)

c)

Figura 11.7
a) Celda unitaria de punto reticular de NaCl que indica las posiciones de los iones Na^+ (radio = 0.102 nm) y Cl^- (radio = 0.181 nm). *b*) Octaedro que muestra la coordinación octaédrica de seis aniones de Cl^- rodeando a un catión central de Na^+. *c*) Celda unitaria de NaCl truncada.

MatVis

PROBLEMA DE EJEMPLO 11.4

Calcule la densidad del NaCl a partir del conocimiento de su estructura cristalina (figura 11.7*a*), los radios iónicos de los iones Na^+ y Cl^-, y las masas atómicas del Na y Cl. Los radios iónicos del $Na^+ = 0.102$ nm y el del $Cl^- = 0.181$ nm. Las masas atómicas del Na = 22.99 g/mol y la del Cl = 35.45 g/mol.

■ Solución

Como se muestra en la figura 11.7*a*, los iones Cl^- contenidos en la celda unitaria de NaCl forman una red cristalina atómica de tipo FCC, y los iones Na^+ ocupan los espacios intersticiales entre los iones Cl^-. Esto es el equivalente de un ion Cl^- en las esquinas de la celda unitaria del NaCl puesto que 8 esquinas $\times \frac{1}{8}$ ion = 1 ion, y es el equivalente de tres iones Cl^- en las caras de la celda unitaria de NaCl, puesto que seis caras $\times \frac{1}{2}$ ion = 3 Cl^- iones, lo que hace un total de cuatro iones Cl^- por celda unitaria de NaCl. Para conservar la neutralidad de carga en la celda unitaria de NaCl, debe haber también el equivalente de cuatro iones de Na^+ por celda unitaria. Así pues, hay cuatro pares de iones Na^+Cl^- en la celda unitaria de NaCl.

Para calcular la densidad de la celda unitaria de NaCl, se determinará primero la masa de una celda unitaria de NaCl y luego su volumen. Conociendo estas dos cantidades, se calcula la densidad m/V.

La masa de una celda unitaria de NaCl es

$$= \frac{(4Na^+ \times 22.99 \text{ g/mol}) + (4Cl^- \times 35.45 \text{ g/mol})}{6.02 \times 10^{23} \text{ átomos (iones)/mol}} = 3.88 \times 10^{-22} \text{ g}$$

El volumen de la celda unitaria de NaCl es igual a a^3, donde a es la constante de red de la celda unitaria de NaCl. Los iones Cl^- y Na^+ hacen contacto entre sí a lo largo de los bordes del cubo de la celda unitaria, como se muestra en la figura 11.8 y, por tanto,

$$a = 2(r_{Na^+} + R_{Cl^-}) = 2(0.102 \text{ nm} + 0.181 \text{ nm}) = 0.566 \text{ nm}$$
$$= 0.566 \text{ nm} \times 10^{-7} \text{ cm/nm} = 5.66 \times 10^{-8} \text{ cm}$$
$$V = a^3 = 1.81 \times 10^{-22} \text{ cm}^3$$

La densidad del NaCl es

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{3.88 \times 10^{-22} \text{ g}}{1.81 \times 10^{-22} \text{ cm}^3} = 2.14 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \blacktriangleleft$$

El valor reportado para la densidad del NaCl es 2.16 g/cm^3.

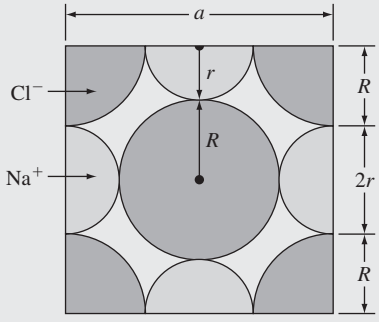


Figura 11.8
Cara del cubo de la celda unitaria de NaCl. Los iones hacen contacto a lo largo del borde del cubo y, por tanto, $a = 2r + 2R = 2(r + R)$.

PROBLEMA DE EJEMPLO 11.5

Calcule la densidad lineal de los iones Ca^{2+} y O^{2-} y exprésela en iones por nanómetro en la dirección [110] del CaO, la cual tiene la estructura del NaCl. (Radios iónicos: Ca^{2+} = 0.106 nm y O^{2-} = 0.132 nm.)

■ Solución

En las figuras 11.7 y EP11.5 se observa que la dirección [110] pasa por dos diámetros del ion O^{2-} en forma transversal al pasar de las posiciones iónicas (0, 0, 0) a la (1, 1, 0). La longitud de la distancia [110] a través de la cara de la base de un cubo unitario es $\sqrt{2}a$, donde a es la longitud de un lado del cubo, o la constante de red. La figura 11.8 muestra la cara del cubo de la celda unitaria de NaCl y se observa que $a = 2r + 2R$. Por tanto, para el CaO,

$$\begin{aligned} a &= 2(r_{Ca^{2+}} + R_{O^{2-}}) \\ &= 2(0.106\text{ nm} + 0.132\text{ nm}) = 0.476\text{ nm} \end{aligned}$$

La densidad lineal de los iones O^{2-} en la dirección [110] es

$$\rho_L = \frac{2O^{2-}}{\sqrt{2}a} = \frac{2O^{2-}}{\sqrt{2}(0.476\text{ nm})} = 2.97O^{2-}/\text{nm} \blacktriangleleft$$

La densidad lineal de los iones Ca^{2-} en la dirección [110] es también 2.97 Ca^{2+}/nm si se fija el origen de la dirección [110] desde (0, 0, 0) a (0, $\frac{1}{2}$, 0). Por tanto, la solución al problema es que hay 2.97 iones (Ca^{2+} o bien O^{2-})/nm en la dirección [110].

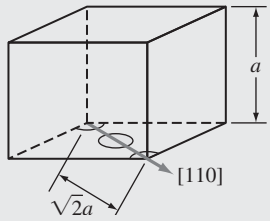


Figura EP11.5

PROBLEMA DE EJEMPLO 11.6

Calcule la densidad planar de los iones Ca^{2+} y O^{2-} en iones por nanómetro cuadrado sobre el plano (111) del CaO, que tiene la estructura del NaCl. (Radios iónicos: Ca^{2+} = 0.106 nm y O^{2-} = 0.132 nm.)

■ Solución

Si se considera que los aniones (iones O^{2-}) están localizados en las posiciones FCC de una celda unitaria cúbica, como se mostró para los iones Cl^- de las figuras 11.7 y EP11.6, entonces el plano (111) contiene el equivalente de dos aniones. [$3 \times 60° = 180° = \frac{1}{2}$ anión + ($3 \times \frac{1}{2}$) aniones en cada punto medio de los lados del triángulo planar (111) de la figura EP11.6 = un total de 2 aniones dentro del triángulo (111).] La constante de red para la celda unitaria $a = 2(r + R) = 2(0.106\text{ nm} + 0.132\text{ nm}) = 0.476$ nm. El área planar $A = \frac{1}{2}bh$, donde $h = \frac{\sqrt{3}}{2}a^2$.

Por tanto,

$$A = \left(\frac{1}{2}\sqrt{2}a\right)\left(\sqrt{\frac{3}{2}}a\right) = \frac{\sqrt{3}}{2}a^2 = \frac{\sqrt{3}}{2}(0.476\text{ nm})^2 = 0.196\text{ nm}^2$$

La densidad planar para los aniones de O^{2-} es

$$\frac{2(O^{2-}\text{ iones})}{0.196\text{ nm}^2} = 10.2O^{2-}\text{ iones/nm}^2 \blacktriangleleft$$

La densidad planar para los cationes Ca^{2+} es la misma si se considera que el Ca^{2+} se localiza en los puntos de red FCC de la celda unitaria y, por tanto,

$$\rho_{\text{planar}}(CaO) = 10.2(Ca^{2+}\text{ o bien }O^{2-})/\text{nm}^2 \blacktriangleleft$$

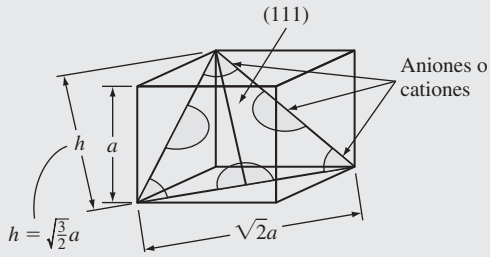
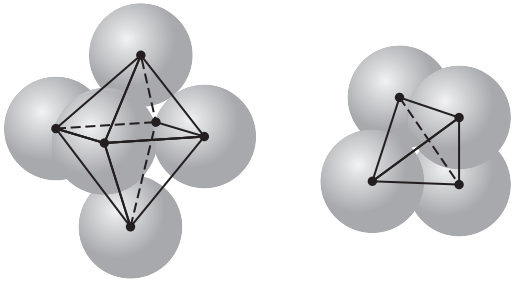


Figura EP11.6

11.2.5 Espacios intersticiales en redes cristalinas FCC y HCP

Hay espacios vacíos o huecos entre los átomos o iones que están empaquetados en una red de estructura cristalina. Estos huecos son *lugares intersticiales* en los cuales otros átomos o iones diferentes de los de la red precursora pueden llenarlos. En las estructuras cristalinas FCC y HCP, que son estructuras de empaquetamiento compacto, hay dos tipos de lugares intersticiales: **octaédrico** y **tetraédrico**. En el sitio octaédrico hay seis átomos o iones próximos equidistantes desde el centro del hueco, como se muestra en la figura 11.9*a*. Este sitio se denomina octaédrico debido a que los átomos o iones que rodean el centro del sitio forman un octaedro de ocho lados. En el sitio tetraédrico hay cuatro átomos o iones más cercanos equidistantes desde el centro del sitio tetraédrico, como se muestra en la figura 11.9*b*. Se forma un tetraedro regular cuando se unen los centros de los cuatro átomos que rodean el hueco.

En la red de estructura cristalina FCC, los espacios intersticiales octaédricos se localizan en el centro de la celda unitaria y en las aristas del cubo, como se indica en la figura 11.10. Hay el equivalente de cuatro espacios intersticiales octaédricos por celda unitaria FCC. Puesto que hay cuatro átomos por celda unitaria FCC, hay un sitio



a) *b*)

Figura 11.9
Huecos intersticiales en redes de estructura cristalina FCC y HCP. *a*) Hueco intersticial octaédrico formado en el centro donde seis átomos hacen contacto entre sí. *b*) Espacio intersticial tetraédrico formado en el centro donde cuatro átomos hacen contacto entre sí.
(W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", 2a. ed., Wiley, 1976.)

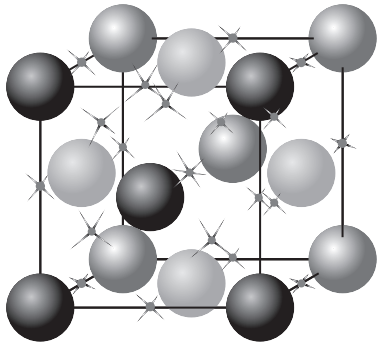


Figura 11.10
Localización de los huecos intersticiales octaédricos y tetraédricos en una celda unitaria de estructura cristalina iónica FCC. Los huecos octaédricos se localizan en el centro de la celda unitaria y en los centros de las aristas del cubo. Como el cubo tiene 12 aristas, un cuarto de un hueco se ubica dentro del cubo en cada arista. Así, hay el equivalente de $12 \times \frac{1}{4} = 3$ huecos dentro de la celda unitaria FCC en las aristas del cubo. Por tanto, hay el equivalente de cuatro huecos octaédricos por celda unitaria FCC (uno en el centro y el equivalente de tres en las aristas del cubo). Los huecos tetraédricos se localizan en las posiciones $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$ que están indicadas por puntos con rayos dirigidos tetraédricamente. Por tanto, hay un total de ocho huecos tetraédricos ubicados dentro de la celda unitaria FCC.
(W. D. Kingery, "Introduction to Ceramics", Wiley, 1960, p. 104.)

intersticial octaédrico por átomo en la red FCC. En la figura 11.11*a* se muestran las posiciones reticulares de los sitios intersticiales octaédricos, en una celda unitaria FCC.

Los huecos tetraédricos de la red FCC se localizan en las posiciones $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$, como se aprecia en las figuras 11.10 y 11.11*b*. En la celda unitaria FCC hay ocho huecos tetraédricos por celda o *dos* por átomo de la celda unitaria FCC precursora. En la estruc-

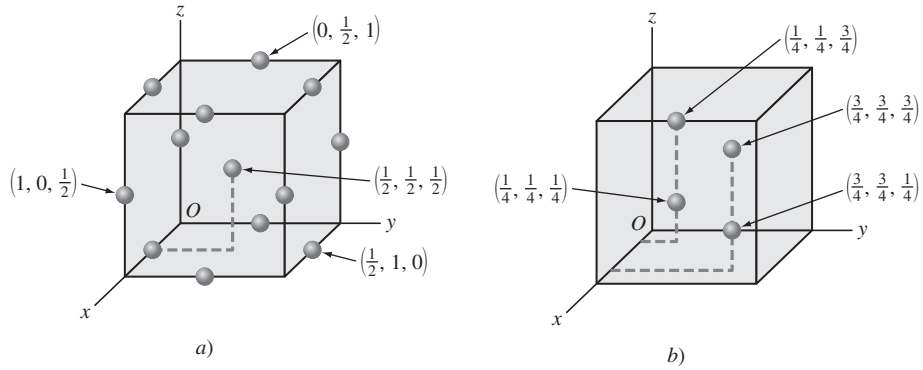


Figura 11.11
Ubicación de los sitios intersticiales en la celda unitaria atómica FCC. *a*) Los huecos octaédricos en la celda unitaria FCC se localizan en el centro de la celda unitaria y en los centros de las aristas del cubo. *b*) Los huecos tetraédricos en la celda unitaria FCC se ubican en las posiciones de celda unitaria indicadas. Únicamente las posiciones representativas han sido incluidas en la figura.

tura cristalina HCP, en virtud de que el empacamiento compacto es similar al de la estructura FCC, también hay el mismo número de huecos intersticiales octaédricos que de átomos en la celda unitaria HCP y el doble de huecos tetraédricos que de átomos.

11.2.6 Estructura cristalina de blenda de zinc (ZnS)

La estructura de blenda de zinc tiene la fórmula química ZnS; la celda unitaria correspondiente aparece en la figura 11.12 y tiene el equivalente de cuatro átomos de zinc y cuatro de azufre. Un tipo de átomo (S o Zn) ocupa los puntos de la red de una celda unitaria FCC, y el otro tipo (ya sea S o Zn) ocupa la mitad de las posiciones intersticiales tetraédricas de la celda unitaria FCC. En la celda unitaria de la estructura cristalina de ZnS que se muestra en la figura 11.12, los átomos de azufre ocupan las posiciones atómicas de la celda unitaria FCC, como lo indican los círculos más claros, y los átomos de Zn ocupan la mitad de las posiciones intersticiales tetraédricas de la celda unitaria FCC, como lo indican los círculos más oscuros. Las coordenadas de posición de los átomos de S y Zn en la estructura cristalina ZnS pueden, entonces, indicarse así

Átomos de S:	$(0, 0, 0)$	$(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$	$(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2})$	$(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$
Átomos de Zn:	$(\frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4})$	$(\frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4})$	$(\frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4})$

De acuerdo con la ecuación de Pauling (ecuación 2.10), el enlace Zn-S tiene 87 por ciento de carácter covalente y, por tanto, la estructura cristalina del ZnS debe estar esencialmente enlazada en forma covalente. Como resultado, la estructura de ZnS es tetraédrica con enlace covalente y los átomos de Zn y S tienen un número de coordinación 4. Muchos compuestos semiconductores, como CdS, InAs, InSb y ZnSe, tienen la estructura cristalina de blenda de zinc.

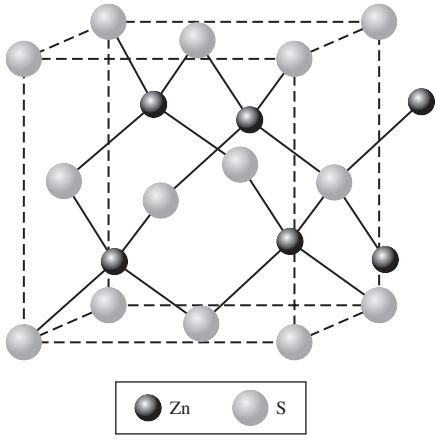


Figura 11.12
Estructura cristalina de blenda de zinc (ZnS). En esta celda unitaria, los átomos de azufre ocupan las posiciones atómicas de la celda unitaria FCC (equivalente de cuatro átomos). Los átomos de zinc ocupan la mitad de los sitios intersticiales tetraédricos (cuatro átomos). Cada átomo de Zn o S tiene un número de coordinación de cuatro y está unido tetraédricamente con enlace covalente a otros átomos.
(W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", 2a. ed., Wiley, 1976.)

MatVis

PROBLEMA DE EJEMPLO 11.7

Calcule la densidad de la blenda de zinc (ZnS). Suponga que la estructura consta de iones y que el radio iónico del $Zn^{2+} = 0.060$ nm y el del $S^{2-} = 0.174$ nm.

■ **Solución**

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa de celda unitaria}}{\text{volumen de celda unitaria}}$$

Hay cuatro iones de zinc y cuatro iones de azufre por cada celda unitaria. Por tanto,

$$\text{Masa de celda unitaria} = \frac{(4Zn^{2+} \times 65.37 \text{ g/mol}) + (4S^{2-} \times 32.06 \text{ g/mol})}{6.02 \times 10^{23} \text{ átomos/mol}}$$

$$= 6.47 \times 10^{-22} \text{ g}$$

$$\text{Volumen de celda unitaria} = a^3$$

A partir de la figura 11.13,

$$\frac{\sqrt{3}}{4}a = r_{Zn^{2+}} + R_{S^{2-}} = 0.060 \text{ nm} + 0.174 \text{ nm} = 0.234 \text{ nm}$$

$$a = 5.40 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

$$a^3 = 1.57 \times 10^{-22} \text{ cm}^3$$

Por tanto,

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{6.47 \times 10^{-22}\ \text{g}}{1.57 \times 10^{-22}\ \text{cm}^3} = 4.12\ \text{g/cm}^3 \blacktriangleleft$$

El valor que aparece reportado para la densidad del ZnS (cúbico) es 4.10 g/cm^3.

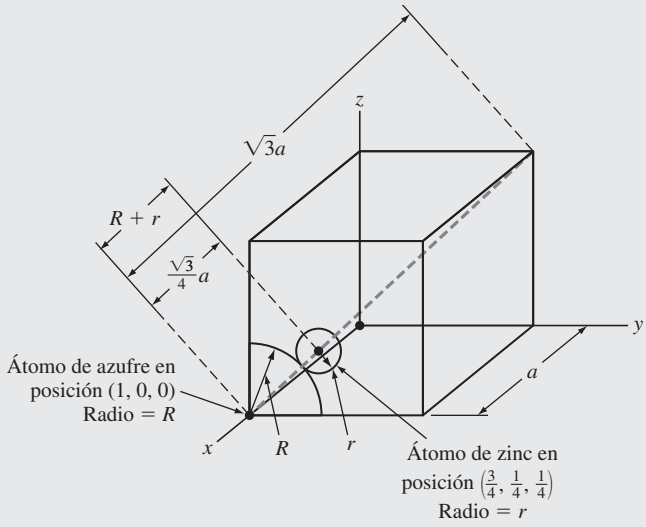


Figura 11.13
Estructura de blenda de zinc mostrando la relación entre la constante de red *a* de la celda unitaria y los radios de los átomos (iones) de azufre y de zinc:

$$\frac{\sqrt{3}}{4}a = r_{Zn^{2+}} + R_{S^{2-}}$$

o bien,

$$a = \frac{4}{\sqrt{3}}(r + R)$$

11.2.7 Estructura cristalina del fluoruro de calcio (CaF_2)

La estructura del fluoruro de calcio tiene la fórmula química CaF_2 y la celda unitaria que se muestra en la figura 11.14. En esta celda unitaria, los iones de Ca^{2+} ocupan los sitios de la red FCC y los iones F^- se localizan en los ocho huecos tetraédricos. Los cuatro huecos octaédricos que quedan en la red FCC permanecen vacantes. Por tanto, hay cuatro iones Ca^{2+} y ocho iones F^- por cada celda unitaria. Algunos ejemplos de compuestos que tienen esta estructura son: UO_2, BaF_2, $AuAl_2$ y $PbMg_2$. El compuesto ZrO_2 tiene una estructura deformada (monoclínica) de CaF_2. El gran número de huecos intersticiales octaédricos desocupados en el UO_2 permite que este material se use como combustible nuclear porque los productos de fisión se pueden alojar en estas posiciones vacantes.

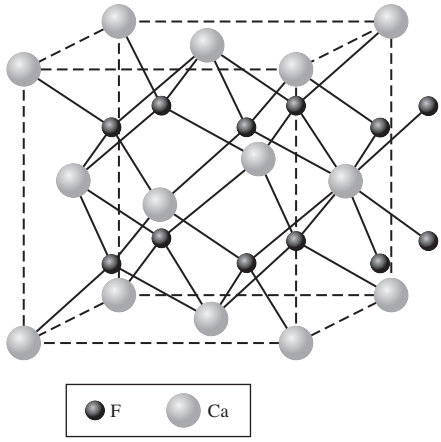


Figura 11.14
Estructura cristalina de fluoruro de calcio (CaF_2) (también llamada estructura de fluorita). En esta celda unitaria, los iones Ca^{2+} se localizan en los espacios de celda unitaria FCC (cuatro iones). Los ocho iones de fluoruro ocupan todos los huecos intersticiales tetraédricos.
(W.D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", 2a. ed., Wiley, 1976.)

MatVis

PROBLEMA DE EJEMPLO 11.8

Calcule la densidad del UO_2 (óxido de uranio) que tiene la estructura del fluoruro de calcio, CaF_2. (Radios iónicos: $U^{4+} = 0.105$ nm y $O^{2-} = 0.132$ nm.)

■ **Solución**

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa/celda unitaria}}{\text{volumen/celda unitaria}}$$

Hay cuatro iones uranio y ocho iones oxígeno por cada celda unitaria (del tipo CaF_2). Por tanto,

$$\text{Masa de una celda unitaria} = \frac{(4U^{4+} \times 238 \text{ g/mol}) + (8O^{2-} \times 16 \text{ g/mol})}{6.02 \times 10^{23} \text{ iones/mol}}$$
$$= 1.794 \times 10^{-21} \text{ g}$$

$$\text{Volumen de una celda unitaria} = a^3$$

A partir de la figura 11.13,

$$\frac{\sqrt{3}}{4}a = r_{U^{4+}} + R_{O^{2-}}$$

$$a = \frac{4}{\sqrt{3}}(0.105 \text{ nm} + 0.132 \text{ nm}) = 0.5473 \text{ nm} = 0.5473 \times 10^{-7} \text{ cm}$$

$$a^3 = (0.5473 \times 10^{-7} \text{ cm})^3 = 0.164 \times 10^{-21} \text{ cm}^3$$

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{1.79 \times 10^{-21} \text{ g}}{0.164 \times 10^{-21} \text{ cm}^3} = 10.9 \text{ g/cm}^3 \blacktriangleleft$$

El valor que se reporta para la densidad de UO_2 es 10.96 g/cm^3.

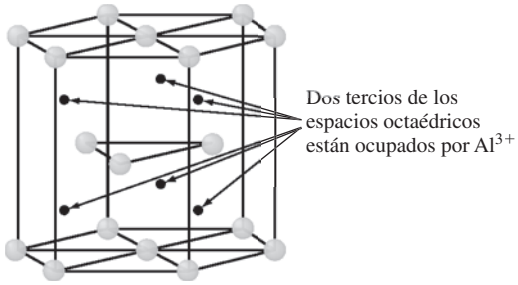


Figura 11.15
Estructura cristalina del corindón (Al_2O_3). Los iones oxígeno (O^{2-}) ocupan los sitios de celda unitaria HCP. Los iones aluminio (Al^{3+}) ocupan solamente dos tercios de los sitios intersticiales del octaedro para conservar la neutralidad eléctrica.

11.2.8 Estructura cristalina de la antifluorita

La estructura de la antifluorita consiste en una celda unitaria FCC con aniones (por ejemplo, iones O^{2-}) que ocupan los puntos de la red FCC. Los cationes (por ejemplo, Li^+) ocupan los ocho sitios tetraédricos de la red FCC. Ejemplos de compuestos con esta estructura son: Li_2O, Na_2O, K_2O y Mg_2Si.

11.2.9 Estructura cristalina del corindón (Al_2O_3)

En la estructura del corindón (Al_2O_3), los iones oxígeno se localizan en los puntos de la red de una celda unitaria hexagonal compacta, como se muestra en la figura 11.15. En la estructura cristalina HCP, como en la estructura FCC, hay tantos huecos intersticiales octaédricos como átomos en la celda unitaria. Sin embargo, puesto que el aluminio tiene una valencia de +3 y el oxígeno una valencia de –2, sólo pueden estar *dos* iones Al^{3+} por cada tres iones O^{2-} para conservar la neutralidad eléctrica. Por tanto, los iones aluminio sólo pueden ocupar dos tercios de los sitios octaédricos de la red HCP del Al_2O_3, lo cual origina cierta deformación de esta estructura.

11.2.10 Estructura cristalina del espinel ($MgAl_2O_4$)

Algunos óxidos tienen la estructura del $MgAl_2O_4$ o espinel, que tiene la fórmula general AB_2O_4, donde A es un ion metálico con valencia de +2, y B es un ion metálico con valencia de +3. En la estructura del espinel, los iones oxígeno forman una red FCC y los iones A y B ocupan los huecos intersticiales del tetraedro y del octaedro, dependiendo del tipo particular de espinel. Los compuestos con la estructura de espinel se usan ampliamente en materiales magnéticos no metálicos para aplicaciones electrónicas y se estudiarán con más detalle en el capítulo 16 de materiales magnéticos.

11.2.11 Estructura cristalina de la perovsquita ($CaTiO_3$)

En la estructura de la perovsquita ($CaTiO_3$) los iones Ca^{2+} y O^{2-} forman una celda unitaria FCC con los iones Ca^{2+} en las esquinas de la celda unitaria y con los iones

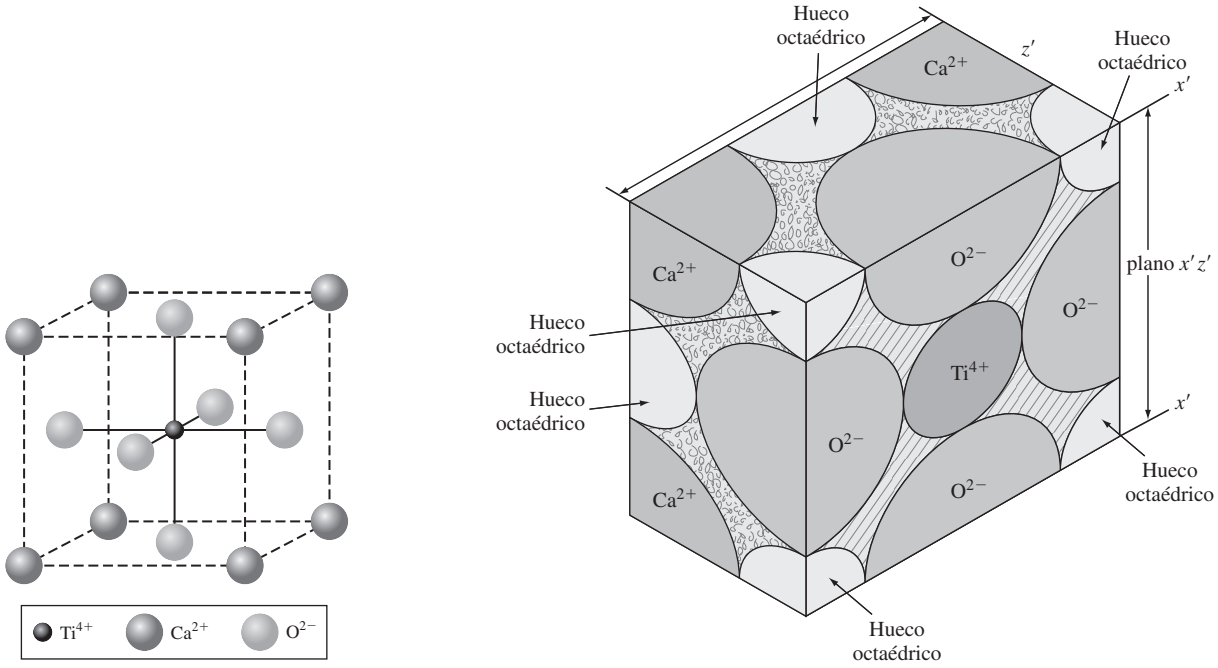


Figura 11.16
Estructura cristalina de la perovsquita ($CaTiO_3$). *a*) Los iones calcio ocupan las esquinas de la celda unitaria FCC y los iones oxígeno ocupan las posiciones centrales en las caras de la celda unitaria FCC. El ion titanio ocupa el sitio intersticial octaédrico en el centro del cubo.
(W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", 2a. ed., Wiley, 1976.)
b) Sección media de la estructura cristalina de la perovsquita ($CaTiO_3$) (truncada).

MatVis

O^{2-} en los centros de las caras de la celda unitaria (figura 11.16). El ion altamente cargado Ti^{4+} se localiza en el sitio intersticial octaédrico que está en el centro de la celda unitaria y está coordinado con seis iones O^{2-}. El $BaTiO_3$ tiene la estructura de la perovsquita por arriba de 120°C, pero por abajo de esta temperatura su estructura está ligeramente cambiada. Otros compuestos que tienen esta estructura son el $SrTiO_3$, $CaZrO_3$, $SrZrO_3$, $LaAlO_3$, y muchos otros. Esta estructura es importante para materiales piezoeléctricos (véase la sección 14.8).

11.2.12 El carbono y sus alótropos

El carbono tiene muchos alótropos; por ejemplo, puede existir en múltiples formas cristalinas. Estos alótropos tienen diferentes estructuras cristalinas y tienen propiedades sustancialmente distintas. El carbono y sus polimorfos no pertenecen directamente a ninguna de las clases convencionales de materiales, pero como el grafito se considera a veces un material cerámico, la discusión de su estructura y la de algunos de sus polimorfos se incluyen en esta sección. En esta sección se tratarán la estructura y propiedades del grafito, diamante, *buckyball* y *buckytube*, todos los cuales son alótropos del carbono.

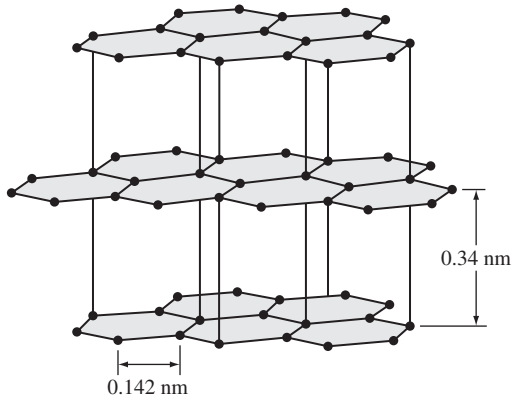
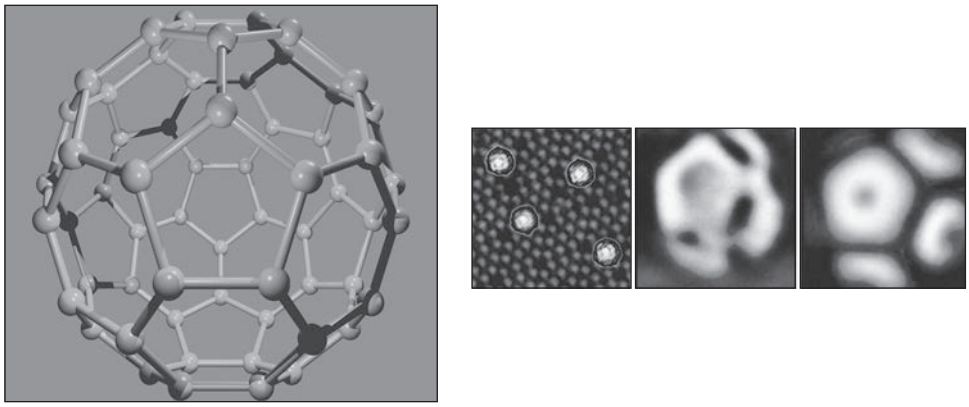


Figura 11.17
Estructura del grafito cristalino. Los átomos de carbono forman capas de distribuciones hexagonales enlazadas fuertemente en forma covalente. Hay enlaces secundarios débiles entre las capas.

MatVis

Grafito La palabra **grafito** se deriva de la palabra griega *graphein* (que significa escribir). El grafito se forma por el enlace trigonal sp^2 de átomos de carbono. Recordando el tratamiento de los orbitales híbridos sp^3 (capítulo 2), los orbitales híbridos sp^2 se forman solamente cuando uno de los electrones 2s se estimula con dos electrones 2p para formar tres orbitales sp^2. El electrón restante forma un orbital no híbrido libre p. Los tres orbitales sp^2 se encuentran en el mismo plano, formando entre sí ángulos iguales de 120 grados. El orbital debido al electrón p no híbrido deslocalizado está dirigido en forma perpendicular al plano de los tres orbitales híbridos sp^2. De acuerdo con esto, el grafito tiene una estructura en capas en las cuales los átomos de carbono de las capas están fuertemente unidas (mediante orbitales sp^2) en distribuciones hexagonales como se muestra en la figura 11.17. Las capas están unidas entre sí por enlaces secundarios débiles y pueden deslizarse sin dificultad unas sobre otras. El electrón libre puede viajar con facilidad de un lado al otro de la capa, pero no se desplaza fácilmente de una capa a otra. Por tanto, el grafito es *anisotrópico* (las propiedades dependen de la dirección). Tiene una densidad baja de 2.26 g/cm^3, es un buen conductor térmico en el plano basal del grafito pero no en el plano perpendicular, y es un buen conductor eléctrico (sólo en el plano basal, no en el perpendicular). El grafito se puede elaborar en largas fibras para materiales compuestos y también puede usarse como lubricante.

Diamante La estructura del diamante se explicó con detalle en el capítulo 2. Tiene una estructura cúbica (figura 2.19) que se basa en orbitales híbridos sp^3 unidos en forma covalente. Sus propiedades son muy distintas de las del grafito. A diferencia del grafito, es isotrópico y tiene una densidad más alta de 3.51 g/cm^3, aproximadamente. El diamante es el material más rígido y duro, y el menos compresible de la naturaleza. Tiene una conductividad térmica muy alta (similar a la del grafito), pero sus valores de conductividad eléctrica son mínimos (en esencia es un excelente aislante). Sin embargo, impurezas tales como el nitrógeno, afectan sus propieda-



a) *b*)

Figura 11.18
a) Esquema de la molécula de C_{60}, *b*) serie de imágenes STM mostrando la molécula de C_{60} (las imágenes de la izquierda y del centro son reales STM y la de la derecha simulada).
[*a) © Tim Evans/Photo Researchers, Inc. b) Omicron NanoTechnology GmbH.)*]

des en forma adversa. El diamante natural es extremadamente caro y su mayor valor es como gema. Sin embargo, los diamantes sintéticos (hechos por el hombre) tienen una dureza comparable, son más baratos y se usan en herramientas de corte, revestimientos y abrasivos.

Fullerenos Buckminster (*Buckyball*) En 1985, los científicos descubrieron la presencia de grupos de átomos de carbono en un intervalo molecular de C_{30} a C_{100}. En 1990, otros científicos fueron capaces de sintetizar esta forma molecular del carbono en el laboratorio. La nueva estructura tiene forma similar a la de estructuras geodésicas de celosía desarrolladas por el arquitecto de renombre mundial Buckminster Fuller. Como resultado de esto, el nuevo polimorfo fue llamado *fullereno* o un ***buckyball***. El *buckyball* es muy parecido a un balón de futbol constituido por 12 pentágonos y 20 hexágonos. En cada punto de unión, un átomo de carbono está unido en forma covalente con otros tres átomos de carbono, como se muestra de forma esquemática en la figura 11.18*a*. La imagen STM de una parte de la molécula de C_{60} se presenta en la figura 11.18*b*. Por tanto, la estructura consiste en un total de 60 átomos de carbono; la molécula resultante es C_{60}. Desde 1990 han sido identificadas también otras formas de esta molécula; por ejemplo, el C_{70}, C_{76} y C_{78}. Estas formas diversas se llaman *fullerenos*. El diámetro del fullereno C_{60} es 0.710 nm y, por tanto, se clasifica como un *nanocúmulo.* La forma agregada del C_{60} tiene una estructura FCC con una molécula de C_{60} en cada punto de la red FCC. En la estructura FCC, las moléculas están unidas por las fuerzas de van der Waals. Por consiguiente, el agregado C_{60} y el grafito tienen aplicaciones similares como lubricantes. Los fullerenos se están estudiando para posibles aplicaciones en las industrias electrónicas y en celdas de combustible, lubricantes y superconductores.

Nanotubos de carbono Otro carbono polimorfo recientemente identificado es el muy interesante nanotubo de carbono. Considérese la laminación de una sola capa atómi-

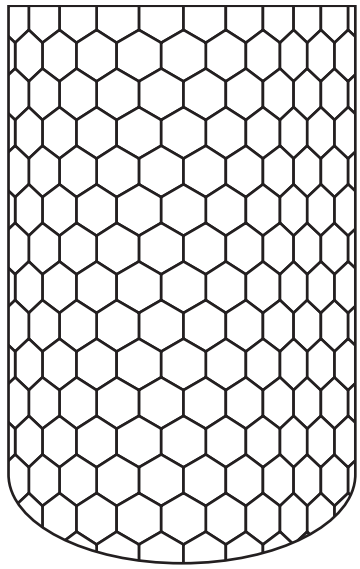


Figura 11.19
Esquema de un nanotubo que muestra patrones hexagonales en el tubo y patrones pentagonales en la tapa del extremo.

ca de grafito (un grafeno) con la estructura hexagonal convencional en forma de tubo, asegurándose de que los hexágonos del borde encajen perfectamente. Luego, al cerrar los extremos del tubo mediante dos hemifullerenos formados sólo de pentágonos, se obtiene la estructura de un nanotubo de carbono (figura 11.19). Aunque se pueden sintetizar nanotubos de diversos diámetros, el que se halla con más frecuencia es el de 1.4 nm de diámetro. La longitud de un nanotubo puede estar en el intervalo de un micrómetro o incluso de un milímetro (esta característica es muy importante). Los nanotubos se pueden sintetizar en forma de *nanotubo de una sola pared* (SWNT) o *nanotubo multiparedes* (MWNT). Se cree que estos nanotubos tienen una resistencia a la tensión 20 veces mayor que los aceros más fuertes. Algunas mediciones muestran realmente una resistencia a la tensión de 45 Gpa en dirección a la longitud del tubo. El módulo elástico de estos nanotubos se ha estimado en un nivel de 1.3 Tpa (T = Tera = 10^{12}). En comparación, la fibra más fuerte a base de carbono disponible comercialmente tiene una resistencia de 7 Gpa y el módulo elástico disponible más alto es, aproximadamente, de 800 Gpa. Además, los nanotubos de carbono tienen baja densidad, alta conductividad térmica y alta conductividad electrónica. Y algo aún más importante: se pueden formar estructuras de cuerdas, fibras y películas delgadas alineando un gran número de estos tubos. La combinación de estas características y propiedades ha convencido a muchos científicos de que los nanotubos de carbono se incluirán en múltiples avances tecnológicos en este siglo. Algunas de las primeras aplicaciones se hacen en puntas de STM por su rigidez y esbeltez, emisores de campo en pantallas planas (o cualquier dispositivo que re-

quiera un cátodo productor de electrones), sensores químicos y fibras para fabricar compuestos.

11.3 ESTRUCTURAS DE SILICATOS

Gran número de materiales cerámicos contienen estructuras de silicatos que constan de átomos de silicio y oxígeno (iones) enlazados entre sí en diversas distribuciones. Además, gran número de minerales naturales como arcillas, feldespatos y micas son silicatos, puesto que el silicio y el oxígeno son los dos elementos más abundantes en la corteza terrestre. Muchos silicatos son útiles para materiales de ingeniería debido a su bajo costo, disponibilidad y propiedades especiales. Las estructuras de silicato son particularmente importantes para materiales de construcción de ingeniería vidriados, cemento portland y ladrillos. Numerosos materiales eléctricos aislantes importantes están hechos también de silicatos.

11.3.1 Unidad estructural básica de las estructuras de silicatos

El bloque de construcción básico de los silicatos es el ion tetraédrico (SiO_4^{4-}) (figura 11.20). El enlace Si—O en la estructura SiO_4^{4-} es, aproximadamente, 50 por ciento covalente y 50 por ciento iónico, de acuerdo con los cálculos de la ecuación de Pauling (ecuación 2.10). La coordinación tetraédrica de SiO_4^{4-} satisface el requisito de direccionalidad del enlace covalente y el requisito de relación de radios del enlace iónico. La razón de radios del enlace Si—O es 0.29, que está en el intervalo de la coordinación tetraédrica para un empaquetamiento compacto de ion estable. Debido al pequeño ion altamente cargado de Si^{4+}, se crean fuerzas de enlace fuertes dentro de los tetraedros de SiO_4^{4-} y, como resultado, las unidades de SiO_4^{4-} están unidas normalmente esquina con esquina y rara vez arista con arista.

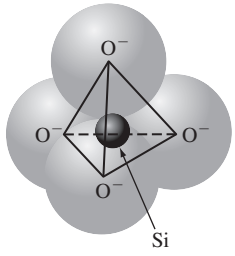


Figura 11.20 Distribución del enlace atómico del ion tetraédrico SiO_4^{4-}. En esta estructura, cuatro átomos de oxígeno rodean a un átomo central de silicio. Cada átomo de oxígeno tiene un electrón adicional y, por tanto, una carga negativa neta para enlazarse con otro átomo.

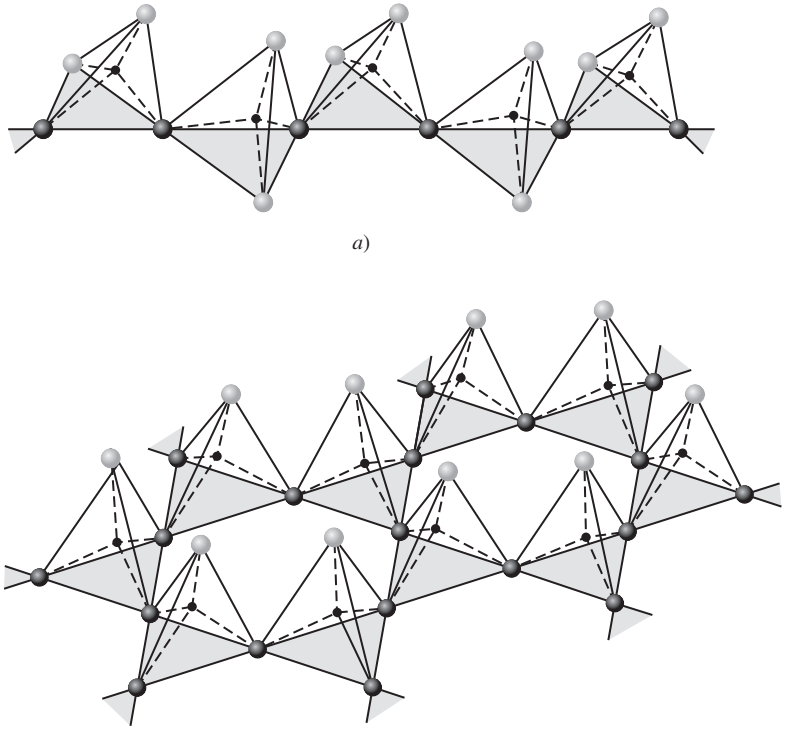
11.3.2 Estructuras insular, cadena y anillo de silicatos

Como cada oxígeno del tetraedro de silicato tiene un electrón disponible para enlazarse, se pueden producir muy diferentes tipos de estructuras de silicato. La estructura insular del silicato se produce cuando iones positivos se enlazan con oxígenos del tetraedro del SiO_4^{4-}. Por ejemplo, los iones Fi^{2+} y Mg^{2+} se combinan con SiO_4^{4-} para formar la olivina, que tiene la fórmula química básica $(Mg,Fe)_2SiO_4$.

Si dos esquinas de cada tetraedro de SiO_4^{4-} están unidas con las esquinas de otro tetraedro, se obtiene una cadena (figura 11.21*a*) o una estructura de anillo con la fórmula química unitaria de SiO_3^{2-}. El mineral enstatita ($MgSiO_3$) tiene una estructura de silicato de cadena única, y el mineral berilo [$Be_3Al_2(SiO_3)_6$] tiene una estructura de anillo de silicato.

11.3.3 Estructuras laminares de silicatos

Las estructuras laminares de silicatos se forman cuando tres esquinas de un mismo plano de un tetraedro de silicato están enlazadas a las esquinas de otros tres tetraedros de silicato, como se muestra en la figura 11.21*b*. Esta estructura tiene la fórmula química unitaria de $Si_2O_5^{2-}$. Estas láminas de silicato pueden enlazarse con otros tipos de láminas estructurales debido a que queda todavía un oxígeno no enlazado en cada te-



a)

b)

Figura 11.21
a) Estructura de cadena de silicato. Dos de los cuatro átomos de oxígeno del tetraedro SiO_4^{4-} están enlazados a otros tetraedros para formar cadenas de silicato. *b*) Estructura de lámina de silicato. Tres de los cuatro átomos de oxígeno del tetraedro de SiO_4^{4-} están enlazados a otro tetraedro para formar láminas de silicato. Los átomos de oxígeno no enlazados aparecen como esferas más claras.
(M. Eisenstadt, "Mechanical Properties of Materials", Macmillan, 1971, p. 82.)

traedro de silicato (figura 11.21*b*). Por ejemplo, la capa de silicato cargada negativamente puede enlazarse con una capa de $Al_2(OH)_4^{2+}$ cargada positivamente para formar una lámina compuesta de caolinita, como se muestra esquemáticamente en la figura 11.22. El mineral caolinita consiste (en su forma pura) en placas planas muy pequeñas de forma más o menos hexagonal, con un tamaño promedio de, aproximadamente, 0.7 μm de diámetro y 0.05 μm de espesor (figura 11.23). Las placas de cristal están hechas de una serie de hojas paralelas (hasta de 50, aproximadamente) enlazadas por enlaces secundarios débiles. Muchas arcillas de alto grado están constituidas principalmente de caolinita mineral.

Otro ejemplo de un silicato laminar es el talco mineral, en el cual una hoja de $Mg_3(OH)_2^{4+}$ se enlaza con dos de la capa exterior del $Si_2O_5^{2-}$ (una de cada lado) para formar una lámina compuesta con la fórmula química unitaria $Mg_3(OH)_2(Si_2O_5)_2$. Las láminas de talco del material compuesto están unidas entre sí por medio de enlaces secundarios débiles y, por tanto, su distribución estructural permite que las placas de talco se deslicen fácilmente unas sobre otras.

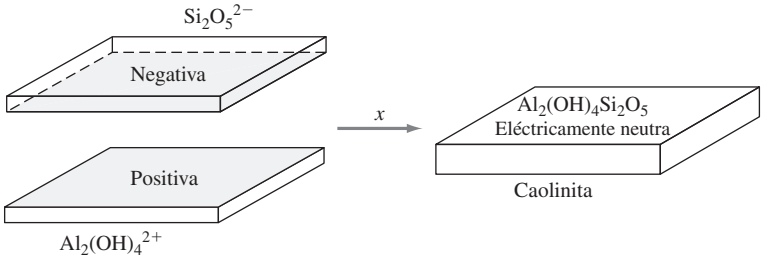
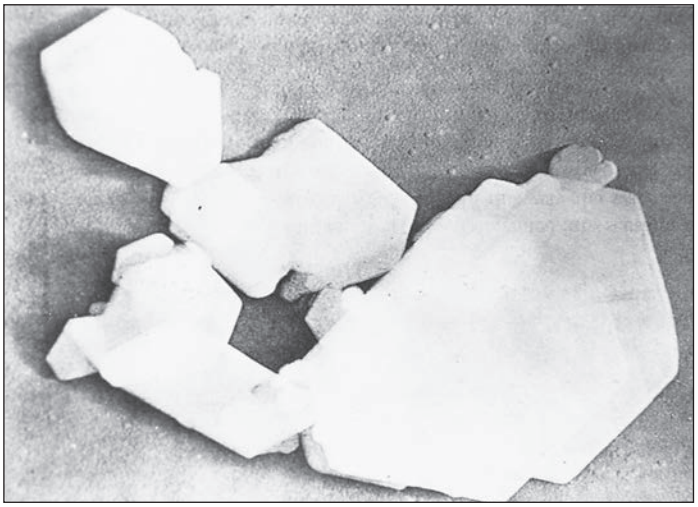


Figura 11.22
Diagrama esquemático de la formación de caolinita a partir de placas de $Al_2(OH)_4^{2+}$ y $Si_2O_5^{2-}$. Se satisfacen todos los enlaces primarios de los átomos en la lámina de caolinita.
(M. Eisenstadt, "Mechanical Properties of Materials", Macmillan, 1971, p. 83.)



MatVis

Figura 11.23
Cristales de caolinita como se observan al microscopio electrónico (técnica de réplica).
(C. E. Hall, como se muestra en F. H. Norton, "Elements of Ceramics", 2a. ed., Addison-Wesley, 1974, p. 16.)

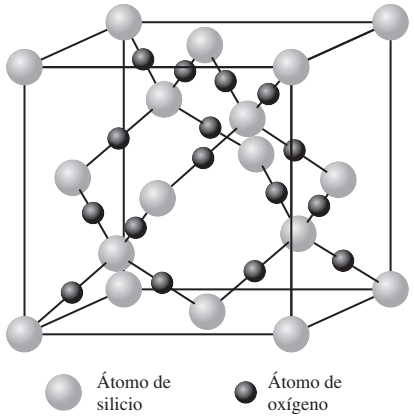


Figura 11.24
Estructura de alta cristobalita que es una forma de sílice (SiO_2). Obsérvese que cada átomo de silicio está rodeado de cuatro átomos de oxígeno y que cada átomo de oxígeno forma parte de dos tetraedros de SiO_4.
(W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", 2a. ed., Wiley, 1976.)

11.3.4 Redes de silicato

Sílice Cuando las cuatro esquinas del tetraedro de SiO_4^{4-} comparten átomos de oxígeno, se produce una red de SiO_2 llamada *sílice* (figura 11.24). La sílice cristalina existe en varias formas polimórficas que corresponden a las diferentes maneras en que está distribuido el tetraedro de silicato con todas las esquinas compartidas. Hay tres estructuras básicas de sílice: *cuarzo*, *tridimita* y *cristobalita*, y cada una de ellas

Tabla 11.3 Composiciones ideales de minerales de silicatos

Sílice:	
Cuarzo	
Tridimita	Fases cristalinas comunes de SiO_2
Cristobalita	
Silicato de alúmina:	
Caolinita (arcilla china)	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
Pirofilita	$Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$
Metacaolinita	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$
Silimanita	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$
Mullita	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$
Silicato de alúmina alcalino:	
Feldespato potásico	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
Feldespato sódico	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
Mica (muscovita)	$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$
Montmorillonita	$Na_2O \cdot 2MgO \cdot 5Al_2O_3 \cdot 24SiO_2 \cdot (6 + n)H_2O$
Leucita	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$
Silicato de magnesio:	
Cordierita	$2MgO \cdot 5SiO_2 \cdot 2Al_2O_3$
Esteatita	$3MgO \cdot 4SiO_2$
Talco	$3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$
Crisotilo (asbestos)	$3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
Forsterita	$2MgO \cdot SiO_2$

Fuente: O. H. Wyatt y D. Dew-Hughes, *Metals, Ceramics and Polymer*s, Cambridge, 1974.

tiene dos o tres modificaciones. Las formas más estables de sílice y los intervalos de temperatura a los cuales existen a presión atmosférica son cuarzo bajo a menos de 573°C, cuarzo alto entre 573 y 867°C, tridimita alta entre 867 y 1 470°C y cristobalita alta entre 1 470 y 1 710°C (figura 11.24). Por arriba de los 1 710°C la sílice es líquida. La sílice es un componente importante de muchas cerámicas tradicionales y de muy diversos tipos de vidrios.

Feldespatos Hay muchos silicatos que se encuentran en la naturaleza que tienen un número infinito de redes de silicatos tridimensionales. Entre los silicatos reticulares importantes para la industria figuran los feldespatos, que se cuentan también entre los principales componentes de las cerámicas tradicionales. En el feldespato de estructura reticular de silicatos, algunos iones Al^{3+} reemplazan a algunos iones Si^{4+} para formar una red con carga neta negativa. Esta carga negativa se equilibra con grandes iones alcalinos y alcalinotérreos como Na^+, K^+, Ca^{2+} y Ba^{2+}, que se colocan en las posiciones intersticiales. En la tabla 11.3 se resumen las composiciones ideales de algunos minerales de silicato.

11.4 PROCESAMIENTO DE CERÁMICAS

La mayor parte de los productos de cerámica tradicionales y de ingeniería se fabrican compactando polvos o partículas en formas que posteriormente se calientan a una temperatura suficientemente alta para que las partículas se unan entre sí. Los pasos básicos del procesamiento de cerámicas por aglomeración de partículas son: 1) preparación del material, 2) formación o vaciado y 3) tratamiento térmico por secado (que generalmente no se requiere) y **cocción** por calentamiento de la pieza de cerámica hasta una temperatura lo bastante alta para que las partículas se unan.

11.4.1 Preparación de materiales

La mayoría de los productos cerámicos están hechos mediante la aglomeración de partículas.[2] Las materias primas para estos productos varían, dependiendo de las propiedades requeridas de la pieza de cerámica terminada. Las partículas y otros ingredientes, como aglutinantes y lubricantes, se pueden mezclar húmedos o secos. En productos de cerámica que no tienen propiedades muy "críticas", como ladrillos comunes, tubos de alcantarillado y otros productos de arcilla, el mezclado de los ingredientes con agua es una práctica común. En otros productos cerámicos, las materias primas se muelen en seco junto con aglutinantes y otros aditivos. A veces, los procesos de humectación y secado de las materias primas se combinan. Por ejemplo, para producir un tipo de aislante de alta alúmina (Al_2O_3), la materia prima en forma de partículas se muele con agua junto con un aglutinante de cera para formar una lechada que posteriormente es secada por aspersión para formar gránulos esféricos pequeños (figura 11.25).

11.4.2 Moldeado

Los productos cerámicos hechos por aglomeración de partículas se pueden conformar por diversos métodos en condiciones secas, plásticas o líquidas. Los procesos de moldeado en frío predominan en la industria de la cerámica, pero los procesos de moldea-

[2] La producción de productos vítreos y el fraguado de concreto son dos importantes excepciones.

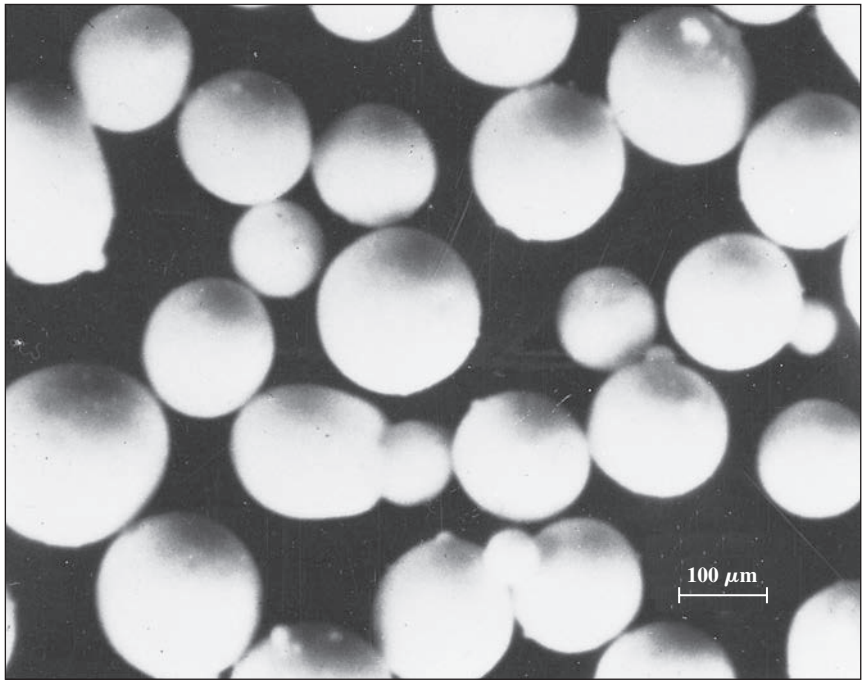


Figura 11.25
Gránulos de cerámica de alta alúmina secados por aspersión.
[J. S. Owens et al., American Ceramic Soc. Bull., **56:***437(1977).]*

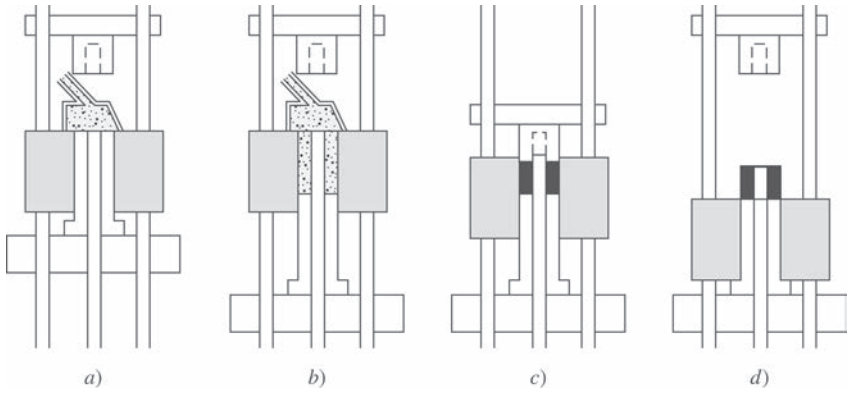


Figura 11.26
Prensado en seco de partículas cerámicas: *a*) y *b*) llenado, *c*) prensado y *d*) extracción.
(J. S. Reed y R. B. Runk, "Ceramic Fabrication Processes", vol. 9: "Treatise in Materials Science and Technology", Academic, 1976, p. 74.)

do en caliente se usan también en cierta medida. El prensado, el moldeo de lechada y la extrusión son métodos de uso común en el moldeado de cerámicas.

Prensado Las materias primas de cerámicas granuladas se pueden prensar en condiciones secas, plásticas o húmedas en un dado para elaborar productos terminados.

Prensado en seco Este método se usa comúnmente para productos tales como refractarios estructurales (materiales resistentes a altas temperaturas) y componentes electrónicos de cerámica. El **prensado en seco** se puede definir como la compactación y formación uniaxial simultáneas de un polvo granulado, con pequeñas cantidades de agua y/o un aglutinante orgánico, en un molde. En la figura 11.26 se muestra una serie de operaciones de prensado en seco de polvos cerámicos en una pieza sencilla. Después del prensado en frío, generalmente las piezas deben ser sometidas a cocción (sinterizadas) para que alcancen las propiedades requeridas de resistencia y microestructura. El prensado en seco se usa ampliamente porque con él se puede formar una amplia variedad de piezas con rapidez, uniformidad y bastante precisión. Por ejemplo, las alúminas, titanatos y ferritas pueden prensarse en seco en tamaños que van desde unos cuantos milésimos a varias pulgadas, en dimensiones lineales, a una tasa de hasta 5 000 por minuto, aproximadamente.

Prensado isostático En este proceso el polvo de cerámica se carga en un contenedor hermético (llamado "bolsa") flexible (generalmente de caucho) que se encuentra dentro de una cámara de fluido hidráulico donde se aplica la presión. En la figura 11.27 se muestra la sección transversal de un aislante de bujía de encendido en un molde de presión isostática. La fuerza de la presión aplicada compacta uniformemente el polvo en todas direcciones, de modo que el producto final toma la forma del contenedor flexible. Después de la **presión isostática** en frío, la pieza debe ser sometida a cocción (sinterizada) para alcanzar las propiedades y microestructura requeridas. Las piezas de cerámica manufacturadas por prensado isostático incluyen refractarios, ladrillos y formas, aislantes para bujías de encendido, radomos, herramientas

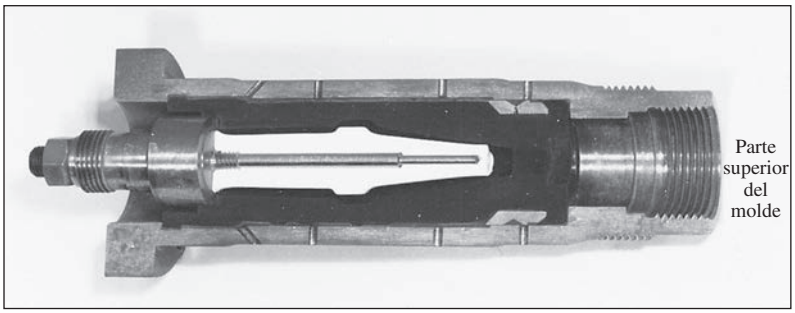
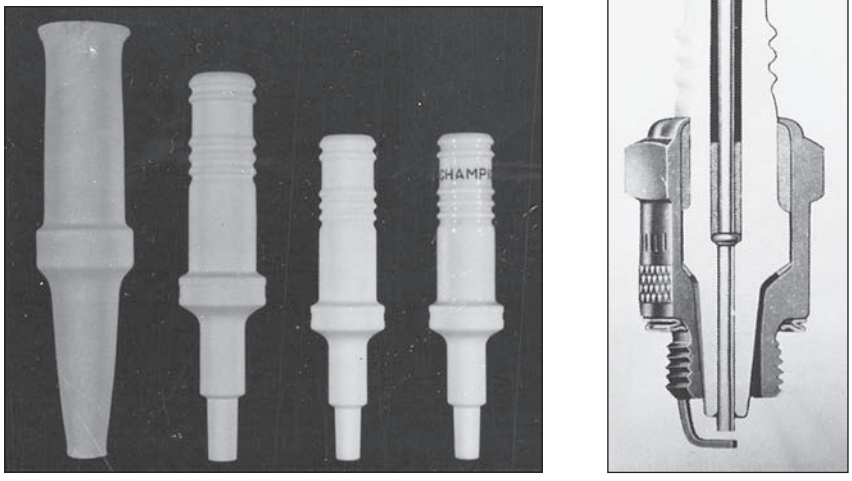


Figura 11.27
Sección transversal del dispositivo para conformar un aislante en un molde de prensado isostático. Gránulos casi esféricos, secados por aspersión (figura 11.25), son alimentados por gravedad en la parte superior del molde y comprimidos por presión isostática, normalmente en un intervalo de 3 000 a 6 000 psi. El fluido hidráulico entra por un lado del molde a través de los agujeros que se observan en la sección transversal.
(Cortesía de Champion Spark-Plug Co.)



a) *b*) *c*) *d*) *e*)

Figura 11.28
Pasos en la fabricación de un aislante de bujía de encendido por el método de procesamiento isostático. *a*) Prensado tosco. *b*) Aislante torneado (pulido). *c*) Aislante cocinado. *d*) Aislante terminado vidriado y decorado. *e*) Sección transversal de una bujía de encendido automotriz armada, mostrando la posición del aislante.
(Cortesía de Champion Spark-Plug Co.)

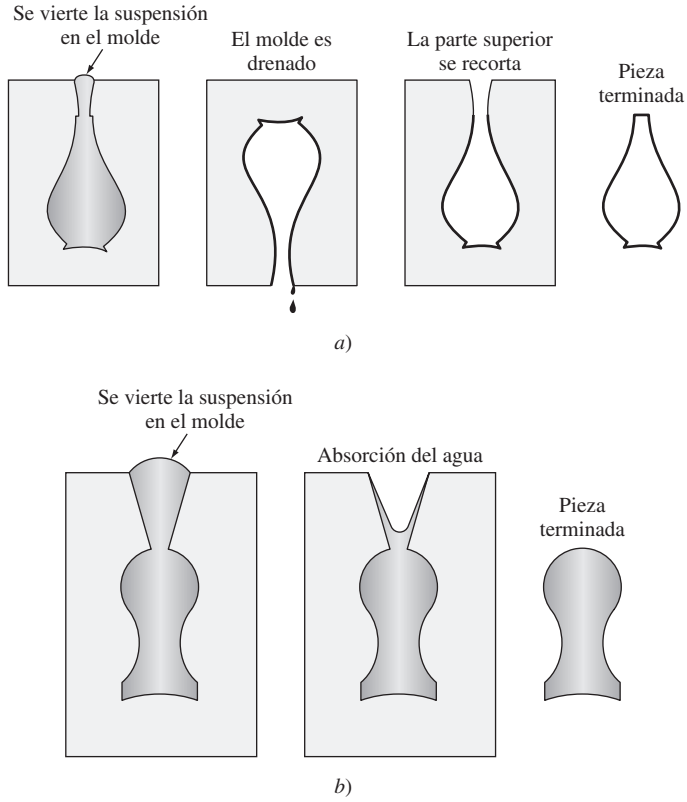


Figura 11.29
Moldeo de vaciado de suspensión de piezas de cerámica.
a) Moldeo por drenado en un molde poroso de yeso de París.
b) Moldeo sólido.
(W. D. Kingery, "Introduction to Ceramics", Wiley, 1960, p. 52.)

de carburo, crisoles y cojinetes. En la figura 11.28 se muestran los pasos en la manufactura del aislante para bujías de encendido por medio de prensado isostático.

Prensado en caliente En este proceso se producen piezas de cerámica de alta densidad con propiedades mecánicas mejoradas, combinando las operaciones de prensado y cocción. Se usan ambos métodos, el uniaxial y el isostático.

Moldeo de vaciado de suspensión Las piezas de cerámica se pueden moldear usando un proceso único llamado **moldeo de vaciado de suspensión**, ilustrado en la figura 11.29. Los principales pasos del moldeo de vaciado de suspensión son:

1. Preparación de un material cerámico pulverizado y un líquido (generalmente arcilla y agua) en una suspensión estable llamada *lechada*.

2. La lechada se vierte en un molde poroso que generalmente está hecho de yeso de París y se deja que la porción líquida de la lechada sea absorbida parcialmente por el molde. A medida que el líquido es removido de la lechada, se forma una capa de material semiduro sobre la superficie del molde.

3. Cuando se ha formado una pared suficientemente gruesa, el proceso de moldeo se interrumpe y el exceso de suspensión es vaciado de la cavidad (figura 11.29*a*). Esto se conoce como *moldeo por drenado*. Alternativamente, se puede elaborar una pieza sólida permitiendo que el moldeo continúe hasta que toda la cavidad del molde se llene, como se ilustra en la figura 11.29*b*. Este tipo de moldeo de lechada se llama *moldeo sólido.*

4. Se permite que el material seque en el molde a fin de obtener la resistencia adecuada para el manejo y la subsecuente extracción de la pieza del molde.

5. Por último, la pieza moldeada se cuece para que adquiera la microestructura y propiedades requeridas.

El moldeo de vaciado de suspensión es conveniente para formar paredes delgadas y formas complejas de grosor uniforme. El moldeo de lechada es especialmente económico para el desarrollo de partes y para tandas de producción cortas. Algunas variaciones recientes de los procesos de moldeo de lechada son el moldeo a presión y al vacío, en el cual la suspensión se moldea bajo presión o al vacío.

Extrusión Se pueden producir secciones transversales y formas con huecos individuales de materiales cerámicos por medio de la extrusión de estos materiales en el estado plástico a través de un dado para darle forma. Este método se usa comúnmente para producir, por ejemplo, ladrillos refractarios, tubería de desagües, losetas acanaladas, cerámicas técnicas y aislantes eléctricos. El medio más usado es la máquina de extrusión tipo vacío-barrena, en la cual el material cerámico plástico (por ejemplo, arcilla y agua) es forzado a pasar a través de un troquel de acero o aleación dura mediante una barrena accionada por motor (figura 11.30). Las cerámicas técnicas especiales se producen con frecuencia usando un pistón de extrusión de alta presión a fin de lograr estrictos márgenes de precisión.

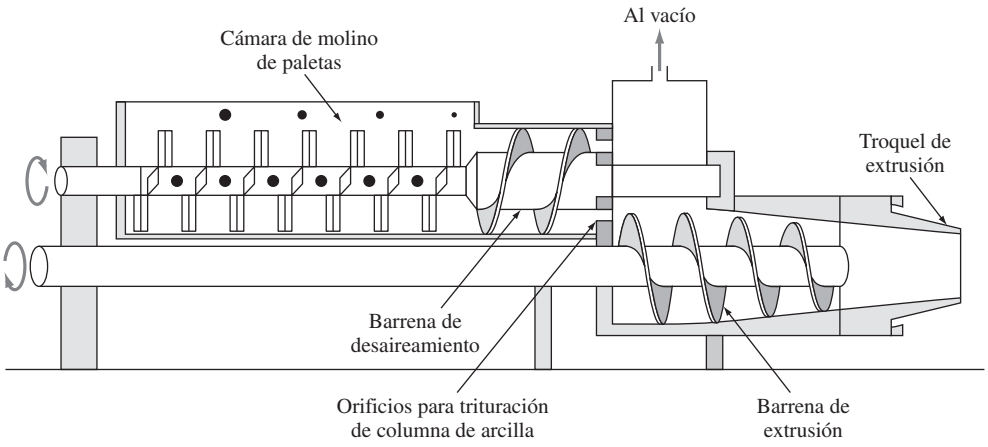


Figura 11.30
Sección transversal de una combinación de molino mezclador (mezclador de paletas) para materiales cerámicos y una máquina de extrusión de vacío y barrena.
(W. D. Kingery, "Introduction to Ceramics", Wiley, 1960.)

11.4.3 Tratamientos térmicos

El tratamiento térmico es un paso esencial en la fabricación de la mayoría de los productos de cerámica. En esta subsección se considerarán los siguientes tratamientos térmicos: secado, sinterizado y vitrificación.

Secado y extracción del aglutinante El propósito de secar la cerámica es extraer el agua de la masa de cerámica plástica antes de su cocción a mayores temperaturas. Generalmente, el secado para remover el agua se lleva a cabo a 100°C o por abajo de esta temperatura, y puede tardar hasta 24 horas en partes de cerámicas grandes. La mayoría de los aglutinantes orgánicos se pueden eliminar de las partes de cerámica por calentamiento en un intervalo de 200 a 300°C, aunque algunos residuos de hidrocarburo pueden requerir un calentamiento a temperaturas mucho más altas.

Sinterización El proceso por el cual pequeñas partículas de un material son unidas entre sí por difusión en el estado sólido se llama **sinterización**. En la fabricación de cerámica, este tratamiento térmico da por resultado que un producto compacto poroso se transforme en uno denso, coherente. La sinterización se usa comúnmente para producir formas de cerámica a base de, por ejemplo, alúmina, berilea, ferritas y titanatos.

En el proceso de sinterización, las partículas se combinan por difusión en el estado sólido a muy altas temperaturas, pero por debajo del punto de fusión del compuesto que se va a sinterizar. Por ejemplo, el aislante de bujía de encendido de alúmina mostrado en la figura 11.28*a* se sinteriza a 1 600°C (el punto de fusión de la alúmina es 2 050°C). En la sinterización se lleva a cabo una difusión atómica entre las superficies de contacto de las partículas, de modo que éstas se enlazan químicamente entre sí (figura 11.31). A medida que el proceso avanza, se forman partículas más grandes a ex-

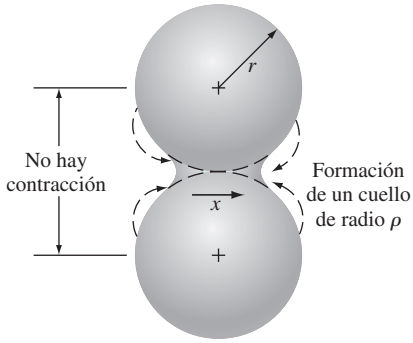


Figura 11.31
Formación de un cuello durante la sinterización de dos partículas finas. La difusión atómica tiene lugar en las superficies de contacto y agranda el área de contacto para formar un cuello.
(J. H. Brophy, R. M. Rose y J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", vol. II: "Thermodynamics of Structure", Wiley, 1964, p. 139.)

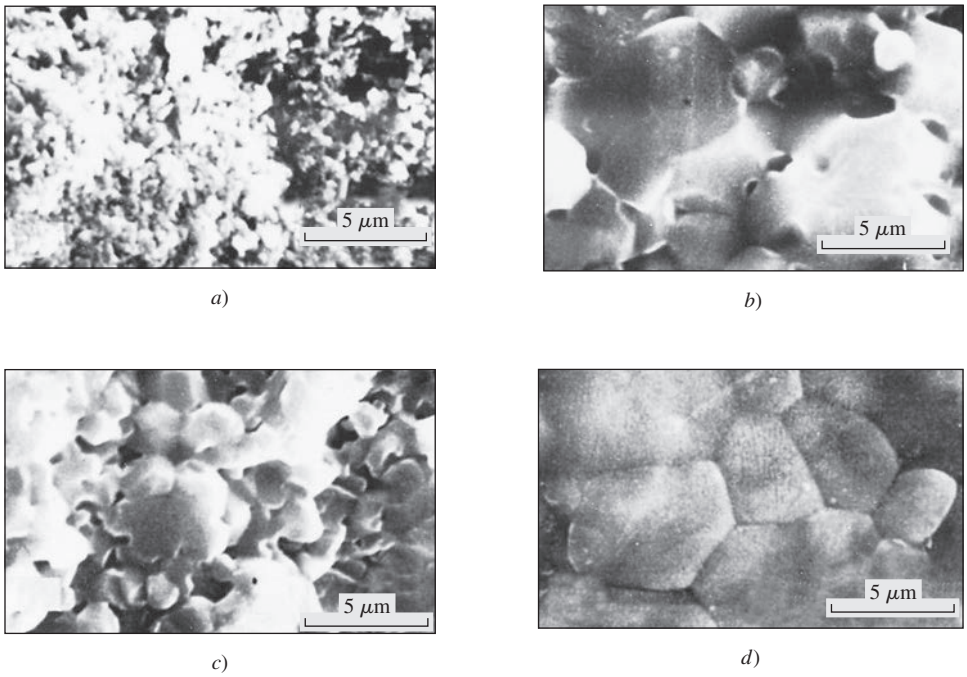


Figura 11.32
Micrografías electrónicas de barrido de superficies fracturadas de compactos de MgO (polvos comprimidos) sinterizados a 1 430°C en aire estático durante *a*) 30 min (porosidad fraccional = 0.39); *b*) 303 min (p.f. = 0.14); *c*) 1 110 min (p.f. = 0.09); la superficie recocida de *c*) se muestra en *d*).
[B. Wong y J. A. Pask, J. Am. Ceram. Soc., **62:***141(1979).]*

pensas de las más pequeñas, como se ilustró en la sinterización de MgO ilustrada en la figura 11.32*a*, *b* y *c*. A medida que las partículas se vuelven más grandes con el tiempo de sinterización, la porosidad de los compactos disminuye (figura 11.33). Por último, al final del proceso se logra un "tamaño de grano de equilibrio" (figura 11.32*d*). La fuerza impulsora del proceso es la disminución de energía del sistema. La alta energía superficial asociada a las pequeñas partículas individuales originales es reemplazada por la energía más baja de las superficies del límite de los granos del producto sinterizado.

Vitrificación Algunos productos de cerámica, como porcelana, productos estructurales de arcilla y algunos componentes electrónicos, contienen una fase vítrea. Esta fase vítrea sirve como un medio de reacción para que la difusión pueda llevarse a cabo a una temperatura más baja que en el resto del material cerámico sólido. Durante la cocción de estos tipos de materiales cerámicos, se lleva a cabo un proceso denominado **vitrificación** por el cual la fase vítrea se funde y llena los espacios porosos del material. Esta fase vítrea líquida puede reaccionar también con parte del material refractario sólido restante. Al enfriarse, la fase líquida solidifica una matriz vítrea o vidriada que une entre sí a las partículas no fundidas.

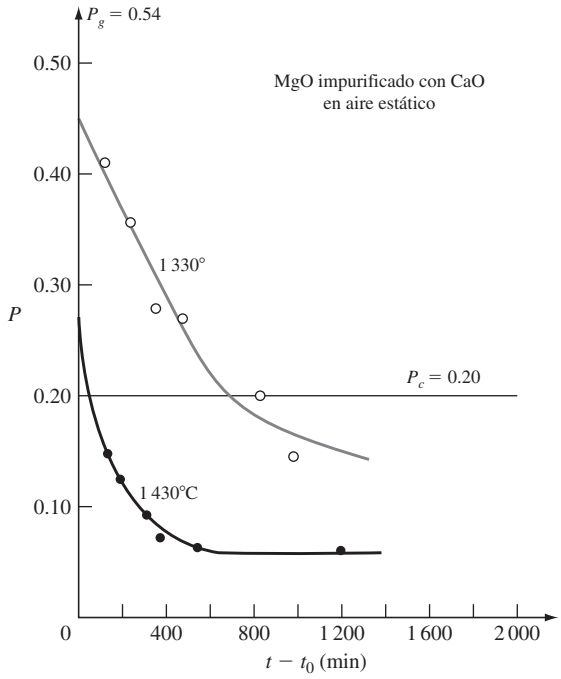


Figura 11.33
Porosidad contra tiempo para compactos de MgO impurificados con 0.2% en peso de CaO y sinterizados en aire estático a 1 330 y 1 430°C. Obsérvese que la temperatura de sinterización más alta produce una disminución más rápida de la porosidad y un menor nivel de porosidad.
[B. Wong y J. A. Pask, J. Am. Ceram. Soc., **62:***141(1979).]*

11.5 CERÁMICAS TRADICIONALES Y DE INGENIERÍA

11.5.1 Cerámicas tradicionales

Las cerámicas tradicionales están hechas de tres componentes básicos: *arcilla, sílice* (sílex) y *feldespato*. La arcilla consta principalmente de silicatos de aluminio hidratados ($Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot H_2O$) con pequeñas cantidades de otros óxidos, como TiO_2, Fe_2O_3, MgO, CaO, Na_2O y K_2O. En la tabla 11.4 se muestran las composiciones químicas de varias arcillas industriales.

La arcilla de la cerámica tradicional permite la fácil manipulación del material antes de su endurecimiento firme y constituye el principal componente del material. La sílice (SiO_2), también llamada *sílex* o cuarzo, tiene una alta temperatura de fusión y es un componente refractario de las cerámicas tradicionales. El feldespato de potasa (potasio), cuya composición básica es $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$, tiene una baja temperatura de fusión y forma un vidrio cuando la mezcla de cerámica se cuece. Esto hace que los componentes refractarios se unan entre sí.

Tabla 11.4 Composición química de algunas arcillas

Tipo de arcilla	Porcentajes en peso de los óxidos principales									Pérdida por ignición
	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	H_2O	
Caolín	37.4	45.5	1.68	1.30	0.004	0.03	0.011	0.005	13.9	
Arcilla de bola de Tennessee	30.9	54.0	0.74	1.50	0.14	0.20	0.45	0.72	⋯	11.4
Arcilla de bola de Kentucky	32.0	51.7	0.90	1.52	0.21	0.19	0.38	0.89	⋯	12.3

Fuente: P. W. Lee, *Ceramics,* Reinhold, 1961.

Tabla 11.5 Algunos compuestos químicos de loza *whiteware* triaxial

Tipo de cuerpo	Arcilla china	Arcilla de bola	Feldespato	Sílex	Otros
Porcelana dura	40	10	25	25	
Loza para aisladores eléctricos	27	14	26	33	
Loza sanitaria vidriada	30	20	34	18	
Aislante eléctrico	23	25	34	18	
Azulejo vidriado	26	30	32	12	
Loza *whiteware* semividriada	23	30	25	21	
Porcelana de hueso	25	⋯	15	22	38 ceniza de huesos
Porcelana de hotel	31	10	22	35	
Porcelana dental	5	⋯	95		2 $CaCO_3$

Fuente: W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics,* 2a. ed. Wiley, 1976, p. 532.

Los productos estructurales de arcilla, como ladrillos de construcción, tubos de drenaje, loseta de drenaje, tejas y azulejos, están hechas de arcilla natural que contiene los tres componentes básicos. Los productos de loza *whiteware*, como porcelana eléctrica, para vajillas y artefactos sanitarios, están hechos de componentes de arcilla, sílice y feldespato, cuya composición se controla. En la tabla 11.5 se muestra la composición química de algunas lozas *whiteware* triaxiales. Se usa el término *triaxial* porque en su composición hay tres materiales principales.

Los intervalos típicos de composición de diferentes tipos de *whiteware* se ilustran en el diagrama de fases ternario sílice-leucita-mullita de la figura 11.34. Los intervalos de composición de algunas *whitewares* se indican con las áreas encerradas en círculos.

Los cambios que se presentan en la estructura de los cuerpos triaxiales durante el cocimiento no se conocen por completo debido a su complejidad. La tabla 11.6 es un resumen aproximado de lo que ocurre posiblemente durante la cocción de un cuerpo de *whiteware*.

La figura 11.35 es una micrografía electrónica de la microestructura de la porcelana de un aislador eléctrico. Como se observa en esta micrografía, la estructura es muy heterogénea. Grandes gránulos de cuarzo están rodeados por un cerco de solución de vidrio con un alto contenido de sílice. Se encuentran también agujas de mullita que cruzan residuos de feldespato y mezclas finas de mullita y vidrio.

Las porcelanas triaxiales son adecuadas como aisladores para 60 ciclos, pero a altas frecuencias las pérdidas dieléctricas son demasiado grandes. Las grandes cantidades de álcalis que se derivan del feldespato y se usan como fundente aumentan la conductividad eléctrica y las pérdidas dieléctricas de las porcelanas triaxiales.

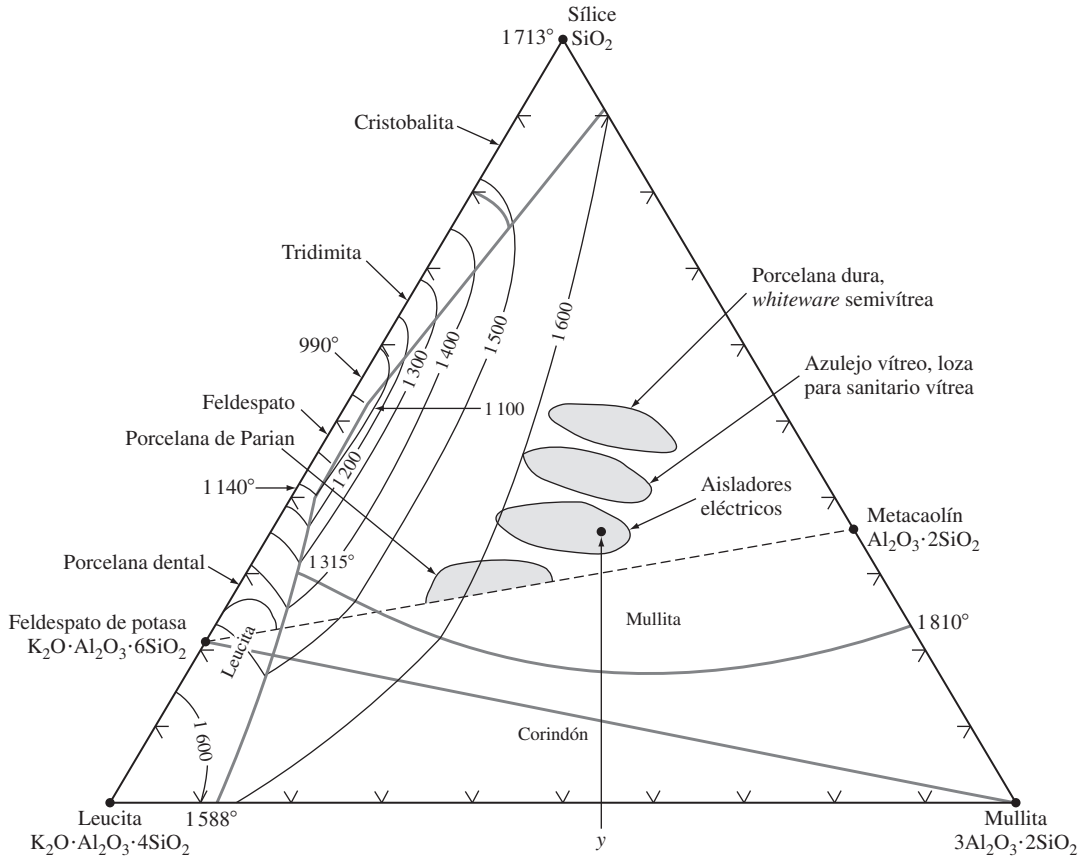


Figura 11.34
Áreas de las composiciones de *whiteware* triaxial mostradas en el diagrama de equilibrio de fases de sílice-leucita-mullita.
(W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", 2a. ed., Wiley, 1976, p. 533.)

Tabla 11.6 Historia de la vida útil de un cuerpo triaxial

Temperatura (°C)	Reacciones
Hasta 100	Pérdida de humedad
100-200	Extracción del agua absorbida
450	Deshidroxilación
500	Oxidación de materia orgánica
573	Inversión del cuarzo a forma alta. Poca afectación al volumen total
980	Se forma espinel a partir de la arcilla. Empieza la contracción
1 000	Formas de mullita primaria
1 050-1 100	Se forma vidrio a partir del feldespato, crece la mullita, el encogimiento continúa
1 200	Más vidrio, la mullita crece, se cierran los poros, algo de solución de cuarzo
1 250	60% de vidrio, 21% de mullita, 19% de cuarzo, porosidad mínima

Fuente: F. Norton, *Elements of Ceramics*, 2a. ed., Addison-Wesley, 1974, p. 140.

Figura 11.35
Micrografía electrónica de la porcelana de un aislador eléctrico (réplica de sílice grabada 10 s, 0°C, 40% HF).
(S. T. Lundin, como aparece en W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", 2a. ed., Wiley, 1976, p. 539.)

11.5.2 Cerámicas de ingeniería

En contraste con las cerámicas tradicionales que se basan principalmente en arcilla, las cerámicas de ingeniería o técnicas son principalmente compuestos puros o casi puros, de óxidos, carburos o nitruros sobre todo. Algunas cerámicas de ingeniería importantes son alúmina (Al_2O_3), nitruro de silicio (Si_3N_4), carburo de silicio (SiC) y circonia (ZrO_2) combinados con otros óxidos refractarios. Las temperaturas de fusión de algunas cerámicas de ingeniería se muestran en la tabla 11.1, y las propiedades mecánicas de algunos de estos materiales aparecen en la tabla 11.7. A continuación se ofrece una breve descripción de varias propiedades, procesos y aplicaciones de algunas cerámicas de ingeniería importantes.

Alúmina (Al_2O_3) La alúmina se desarrolló originalmente para tubos refractarios y crisoles de alta pureza que pueden ser usados a altas temperaturas, y en la actualidad tiene una amplia aplicación. Un ejemplo clásico de la aplicación de la alúmina es como material aislante para bujías de encendido (figura 11.28). El óxido de aluminio se impurifica comúnmente con óxido de magnesio, comprimido en frío y sinterizado, lo que produce el tipo de microestructura que se ilustra en la figura 11.36. Obsérvese la uniformidad de la estructura del grano de alúmina comparado con la microestructura de la porcelana eléctrica de la figura 11.35. La alúmina se usa comúnmente en aplicaciones eléctricas de alta calidad donde se requiere una baja pérdida dieléctrica y alta resistividad.

Tabla 11.7 Propiedades mecánicas de materiales cerámicos de ingeniería seleccionados

Material	Densidad (g/cm^3)	Resistencia a la compresión		Resistencia a la tensión		Resistencia a la flexión		Tenacidad a la fractura	
		MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	$MPa\sqrt{m}$	$ksi\sqrt{m}$
Al_2O_3 (99%)	3.85	2 585	375	207	30	345	50	4	3.63
Si_3N_4 (prensado en caliente)	3.19	3 450	500	···	···	690	100	6.6	5.99
Si_3N_4 (unido por reacción)	2.8	770	112	···	···	255	37	3.6	3.27
SiC (sinterizado)	3.1	3 860	560	170	25	550	80	4	3.63
ZrO_2, 9% MgO (parcialmente estabilizado)	5.5	1 860	270	···	···	690	100	8+	7.26+

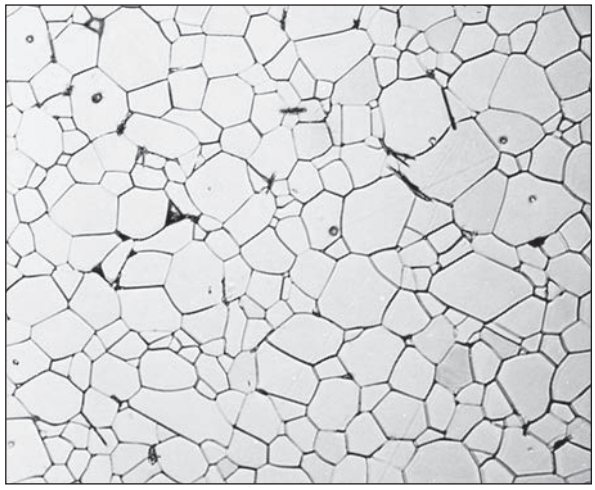


Figura 11.36
Microestructura de óxido de aluminio pulverizado sinterizado, impurificado con óxido de magnesio. La temperatura de sinterización fue de 1 700°C. La microestructura está casi libre de porosidad y sólo hay unos cuantos poros dentro de los granos. (Amplificación 500×.)
(Cortesía de C. Greskovich y K. W. Lay.)

Nitruro de silicio (Si_3N_4) De todas las cerámicas de ingeniería, el nitruro de silicio tiene probablemente la combinación más útil de propiedades para ingeniería. El Si_3N_4 se disocia significativamente a temperaturas por arriba de 1 800°C y, en consecuencia, no se puede sinterizar directamente. El Si_3N_4 se puede procesar por una reacción de enlace en la que el polvo compactado de silicio es nitrurado en un flujo de gas nitrógeno. Este proceso produce un Si_3N_4 microporoso de resistencia moderada (tabla 11.7). El Si_3N_4 no poroso de mayor resistencia se elabora mediante prensado en caliente con 1 a 5% de MgO. El Si_3N_4 se estudia para ser usado en partes de máquinas avanzadas (figura 1.8*a*).

Carburo de silicio (SiC) El carburo de silicio es un carburo refractario duro que tiene una notable resistencia a la oxidación a altas temperaturas. Aunque no es un óxido, el SiC a altas temperaturas forma una película de SiO_2 que protege al cuerpo principal del material. El SiC puede ser sinterizado a 2 100°C con 0.5 a 1% B

como auxiliar del proceso. El SiC se usa comúnmente como reforzamiento fibroso para materiales compuestos de matriz metálica y matriz cerámica.

Circonia (ZrO_2) La circonia pura es polimórfica y se transforma de la estructura tetragonal en la monoclínica a unos 1 170°C acompañada de una expansión de volumen y, por tanto, está sujeta al agrietamiento. Sin embargo, combinando la ZrO_2 con otros óxidos refractarios como CaO, MgO y Y_2O_3, se puede estabilizar la estructura cúbica a temperatura ambiente y se le han encontrado algunas aplicaciones. Combinando el ZrO_2 con 9% MgO y usando tratamientos térmicos especiales, se puede producir circonia parcialmente estabilizada (PSZ) con una tenacidad a la fractura especialmente alta, lo que ha conducido a aplicaciones cerámicas recientes. (Véase la sección 11.6 sobre tenacidad a la fractura de cerámicas para más detalles.)

11.6 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS CERÁMICAS

11.6.1 Generalidades

Como un tipo de material, las cerámicas son relativamente frágiles. La resistencia a la tensión observada en los materiales cerámicos varía mucho, en un intervalo que abarca desde valores muy bajos de menos de 100 psi (0.69 MPa) hasta aproximadamente 10^6 psi (7×10^3 MPa) para triquitas (fibra cerámica refractaria formada por monocristales) como Al_2O_3 preparadas bajo cuidadosas condiciones controladas. Sin embargo, como un tipo de material, algunas cerámicas tienen resistencias a la tensión superiores a 25 000 psi (172 MPa). También hay grandes diferencias entre las resistencias a la tensión y a la compresión de los materiales cerámicos, siendo las resistencias a la compresión generalmente de unas cinco a 10 veces más altas que las resistencias a la tensión, como se indica en la tabla 11.7 para el material cerámico Al_2O_3 de 99 por ciento. Además, muchos materiales cerámicos son duros y tienen baja resistencia al impacto debido a sus enlaces iónicos-covalentes. Sin embargo, hay muchas excepciones a estas generalizaciones. Por ejemplo, la arcilla plastificada es un material cerámico blando y fácilmente deformable a causa de sus fuerzas de enlaces secundarios débiles entre las capas de átomos enlazados fuertemente en forma iónica y covalente.

11.6.2 Mecanismos para la deformación de materiales cerámicos

La carencia de plasticidad de las cerámicas cristalinas se debe a sus enlaces químicos iónicos y covalentes. En los metales, la deformación plástica se presenta principalmente por el movimiento de líneas de falla (dislocaciones) en la estructura cristalina sobre planos de deslizamiento especiales (véase la sección 7.4). En los metales, las dislocaciones se mueven bajo esfuerzos relativamente bajos debido a la naturaleza no direccional del enlace metálico y porque todos los átomos que participan en los enlaces tienen una carga negativa igualmente distribuida en su superficie. Es decir, que no hay iones cargados positiva o negativamente involucrados en los procesos de enlace metálico.

En cristales covalentes y cerámicas unidas en forma covalente, el enlace entre átomos es específico y direccional, involucrando el intercambio de cargas electrónicas entre pares de electrones. Así, cuando los cristales covalentes se someten a esfuerzos suficientemente grandes, sufren una fractura frágil a causa de la separación de los enlaces de pares de electrones sin su reformación subsecuente. Las cerámicas unidas en forma covalente, por tanto, son frágiles en el estado de monocristal y en el del policristalino.

La deformación de cerámicas unidas principalmente en forma iónica es diferente. Los cristales individuales de sólidos unidas iónicamente, como el óxido de magnesio y el cloruro de sodio, muestran una considerable deformación plástica bajo esfuerzos de compresión a temperatura ambiente. Las cerámicas policristalinas unidas iónicamente, sin embargo, son frágiles, pues se forman fracturas en los límites de los granos.

Se examinarán brevemente algunas condiciones en las que un cristal iónico se puede deformar, como se ilustra en la figura 11.37. El deslizamiento de un plano de iones sobre otro involucra iones de diferente carga que se ponen en contacto, con lo cual se pueden producir fuerzas de atracción y repulsión. La mayoría de los cristales unidos iónicamente que tienen una estructura del tipo NaCl se deslizan en los sistemas $\{110\}\langle 1\bar{1}0\rangle$ debido a que el deslizamiento de la familia de planos {110} incluye solamente iones de carga diferente y, por tanto, los planos deslizantes no dejan de atraerse entre sí por fuerzas de Coulomb durante el proceso de deslizamiento. El deslizamiento del tipo {110} se indica por la línea AA' de la figura 11.37. Por otra parte, el deslizamiento sobre la familia de planos {100} se observa en raras ocasiones porque se ponen en contacto iones de la misma carga, lo cual tiende a provocar la separación de los planos de iones que se deslizan unos sobre otros. Este deslizamiento tipo {100} está indicado por la línea BB' de la figura 11.37. Muchos materiales cerámicos en la forma de cristales individuales muestran considerable plasticidad. Sin embargo, en las cerámicas policristalinas los gránulos adyacentes pueden cambiar su forma durante la deformación. Como hay pocos sistemas de deslizamiento en los sólidos unidos iónicamente, el agrietamiento se produce en los límites de los granos y subsecuentemente se presenta la fractura frágil. La mayoría de las cerámicas industrialmente importantes son policristalinas, casi todos los materiales cerámicos tienden a ser frágiles.

11.6.3 Factores que afectan la resistencia de los materiales cerámicos

La falla mecánica de los materiales cerámicos se presenta principalmente por defectos estructurales. Las principales fuentes de fractura en policristales cerámicos son las grietas superficiales producidas durante el acabado superficial, los huecos (porosidad), las inclusiones y los granos grandes que se forman durante el procesamiento.[3]

Los poros en los materiales cerámicos frágiles son regiones donde se concentra el esfuerzo y cuando dicho esfuerzo sobre un poro alcanza un valor crítico, se forma una grieta y se propaga porque en estos materiales no hay grandes procesos de absorción de energía como los que ocurren en los metales dúctiles durante la deformación. Por tanto, una vez que la grieta empieza a propagarse, continúa creciendo hasta que se presenta la fractura. Los poros son también perjudiciales para la resistencia de los materiales cerámicos ya que reducen el área transversal sobre la cual se aplica la carga y, por consiguiente, el esfuerzo que puede soportar un material es menor. Así pues, la fracción en volumen y tamaño de los poros en los materiales cerámicos son factores importantes que afectan su resistencia. En la figura 11.38 se muestra cómo un incremento en la fracción en volumen de poros hace disminuir la resistencia a la tensión transversal de la alúmina.

Los defectos en las cerámicas procesadas también pueden ser críticos en la determinación de la resistencia a la fractura de un material cerámico. Un defecto grande puede ser el principal factor que afecte la resistencia de una cerámica. En los materiales ce-

[3] A. G. Evans, *J. Am. Ceram. Soc.,* **65:**127(1982).

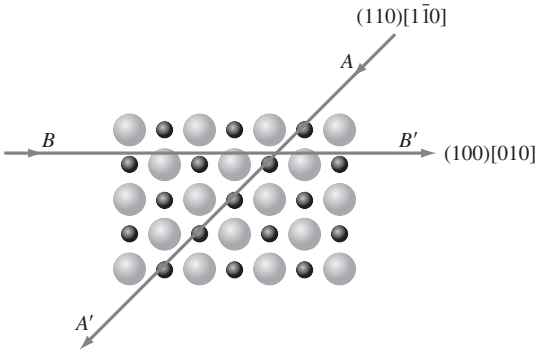


Figura 11.37
Vista superior de una estructura cristalina de NaCl que indica *a*) deslizamiento en el plano (110) y en la dirección [110] (línea *AA´*) y *b*) deslizamiento en el plano (100) y en la dirección [010] (línea *BB´*).

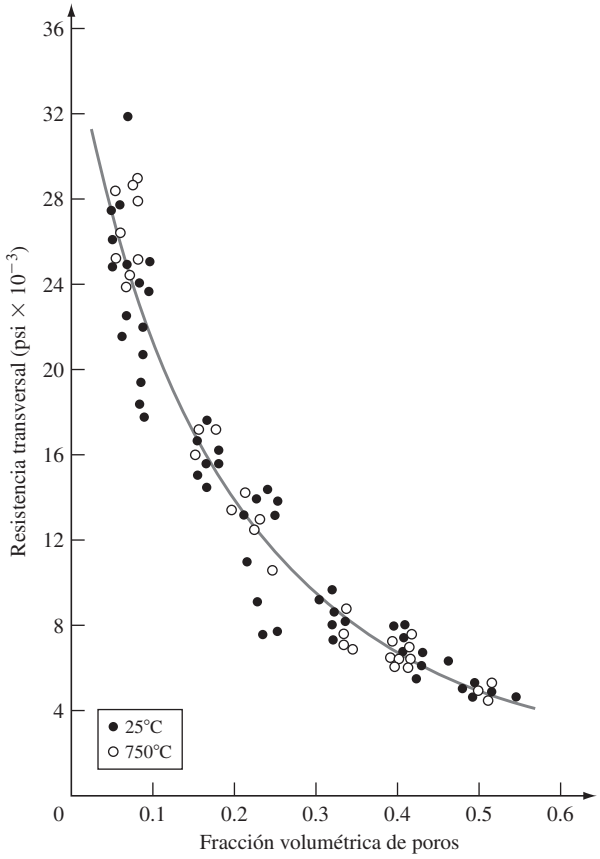


Figura 11.38
Efecto de la porosidad sobre la resistencia transversal de alúmina pura.
[R. L. Coble y W. D. Kingery, J Am. Ceram. Soc., **39***:377(1956).]*

rámicos totalmente densos que no tienen grandes porosidades, el tamaño del defecto generalmente se relaciona con el tamaño del grano. En cerámicas libres de porosidad, la resistencia de un material cerámico puro es función de su tamaño de grano, pues las cerámicas cuyo tamaño de grano es más fino tienen defectos más pequeños en los límites del grano y, por consiguiente, son más resistentes que las de grano grande.

Así, la resistencia de un material cerámico policristalino está determinada por múltiples factores, entre los cuales la composición química, la microestructura y la condición de la superficie son los principales. La temperatura y el medio ambiente también son importantes así como el tipo de esfuerzo y la forma en que se aplica. Sin embargo, la falla de la mayoría de los materiales cerámicos a temperatura ambiente se origina generalmente en el defecto más grande.

11.6.4 Tenacidad de los materiales cerámicos

Los materiales cerámicos, debido a su combinación de enlace iónico y covalente, tienen una baja tenacidad inherente. En años pasados se han llevado a cabo múltiples in-

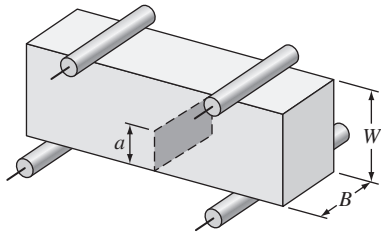


Figura 11.39
Dispositivo para la prueba de tenacidad a la fractura en cuatro puntos de una viga de material cerámico usando una entalladura en un solo borde.

vestigaciones para mejorar la tenacidad de los materiales cerámicos. Mediante el uso de ciertos procesos, como cerámicas prensadas en caliente con aditivos y reacciones de enlace, se han producido cerámicas de ingeniería con mejor tenacidad (tabla 11.7).

Las pruebas de tenacidad a la fractura se pueden realizar en muestras de cerámica para determinar los valores K_{IC} en forma similar a la prueba de la tenacidad a la fractura de los metales (véase la sección 7.3). Los valores K_{IC} para materiales cerámicos se obtienen de ordinario con una prueba de flexión de cuatro puntos con una barra a la que se le ha hecho en un solo borde una entalladura o melladura en zigzag (figura 11.39). La ecuación de tenacidad a la fractura,

$$K_{IC} = Y\sigma_f\sqrt{\pi a} \qquad \textbf{(11.1)}$$

que relaciona valores de tenacidad a la fractura K_{IC} con el esfuerzo de ruptura y el tamaño del mayor defecto, se puede usar también para materiales cerámicos. En la ecuación 11.1, K_{IC} se mide en MPa $\sqrt{\text{m}}$ (ksi $\sqrt{\text{pulg}}$), el esfuerzo de ruptura σ_f en MPa (ksi), y a (la mitad del tamaño del defecto interno más grande) en metros (pulgadas). Y es una constante adimensional aproximadamente igual que 1. El problema de ejemplo 11.9 muestra cómo se puede usar esta ecuación para determinar el tamaño del de-

PROBLEMA DE EJEMPLO 11.9

Una cerámica de nitruro de silicio unida mediante reacción tiene una resistencia de 300 MPa y una tenacidad a la fractura de 3.6 MPa $\sqrt{\text{m}}$. ¿Cuál es la grieta interna de mayor tamaño que este material puede soportar sin fracturarse? Use $Y = 1$ en la ecuación de tenacidad a la fractura.

■ **Solución**

$$\sigma_f = 300 \text{ MPa} \qquad K_{IC} = 3.6 \text{ MPa-}\sqrt{\text{m}} \qquad a = ? \qquad Y = 1$$

$$K_{IC} = Y\sigma_f\sqrt{\pi a}$$

o bien,

$$a = \frac{K_{IC}^2}{\pi\sigma_f^2} = \frac{(3.6 \text{ MPa-}\sqrt{\text{m}})^2}{\pi(300 \text{ MPa})^2}$$

$$= 4.58 \times 10^{-5} \text{ m} = 45.8\ \mu\text{m}$$

Por tanto, la mayor grieta interna $= 2a = 2(45.8\ \mu\text{m}) = 91.6\ \mu\text{m}$. ◄

fecto más grande de tenacidad a la fractura y resistencia conocidas que puede tolerar, sin fracturarse, una cerámica de ingeniería en particular.

11.6.5 Reforzamiento de la tenacidad de la circonia parcialmente estabilizada (PSZ)

Recientemente se ha descubierto que las transformaciones de fase de la circonia combinada con otros óxidos refractarios (como CaO, MgO o Y_2O_3) pueden producir materiales cerámicos con una tenacidad a la fractura excepcionalmente alta. Enseguida se verán los mecanismos que producen transformación de la tenacidad en el material cerámico de ZrO_2-9 mol % MgO. La circonia pura, ZrO_2, existe en tres estructuras cristalinas: *monoclínica*, entre temperatura ambiente y 1 170°C; *tetragonal*, de 1 170 a 2 370°C; y *cúbica* (la estructura de fluorita de la figura 11.14), por arriba de 2 370°C.

La transformación de la estructura tetragonal en la monoclínica de la ZrO_2 pura es martensítica y no puede evitarse por enfriamiento rápido. Además, esta transformación va acompañada de un incremento de volumen de, aproximadamente, 9 por ciento, por lo cual es imposible fabricar artículos de circonia pura. Sin embargo, mediante la adición de 10% mol de otros óxidos refractarios, como CaO, MgO o Y_2O_3, la forma cúbica de la circonia se estabiliza de modo que puede existir a temperatura ambiente en el estado metaestable y es posible fabricar artículos con este material. El ZrO_2 cúbico combinado con óxidos estabilizadores de modo que conserve la estructura cúbica a temperatura ambiente se conoce como *circonia totalmente estabilizada.*

Investigaciones recientes han producido materiales cerámicos de óxido de circonia-refractarios con dureza y resistencia mejoradas aprovechando sus transformaciones de fase. Uno de los compuestos cerámicos de circonia más importantes es la circonia estabilizada parcialmente (PSZ) que contiene 9 mol % MgO. Si una mezcla de ZrO_2-9 mol % MgO se sinteriza a 1 800°C, aproximadamente, como se indica en el diagrama de fase de ZrO_2-MgO de la figura 11.40*a*, y luego se enfría rápidamente a temperatura ambiente, tendrá una estructura cúbica metaestable. Sin embargo, si este material se recalienta a 1 400°C y se conserva así por tiempo suficiente, se precipita con una estructura tetragonal un sólido submicroscópico metaestable fino, como se muestra en la figura 11.40*b*. Este material se conoce como *circonia parcialmente estabilizada* (PSZ). Bajo la acción de esfuerzos que causan pequeñas grietas en el material cerámico, la fase tetragonal se transforma en la fase monoclínica, provocando una expansión del volumen del precipitado que retarda la propagación de la grieta por una especie de mecanismo de cerrado de la misma. Al impedir los avances de las grietas, la cerámica es "reforzada" (figura 11.40*c*). La circonia parcialmente estabilizada tiene una tenacidad a la fractura de $8 + \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, más alta que la de todos los demás materiales cerámicos de ingeniería que aparecen en la lista de la tabla 11.7.

11.6.6 Falla por fatiga de cerámicos

La falla por fatiga en metales se presenta bajo esfuerzos cíclicos repetidos por la nucleación y la formación de grietas en un área endurecida por deformación plástica de una muestra. Debido al enlace iónico-covalente de los átomos en un material cerámico, hay una ausencia de plasticidad en las cerámicas durante el esfuerzo cíclico. En consecuencia, la fractura por fatiga es rara en las cerámicas. Recientemente, se ha informado de resultados de crecimiento estable de grietas por fatiga a temperatura ambiente bajo ciclos de compresión y esfuerzo de compresión en láminas melladas de

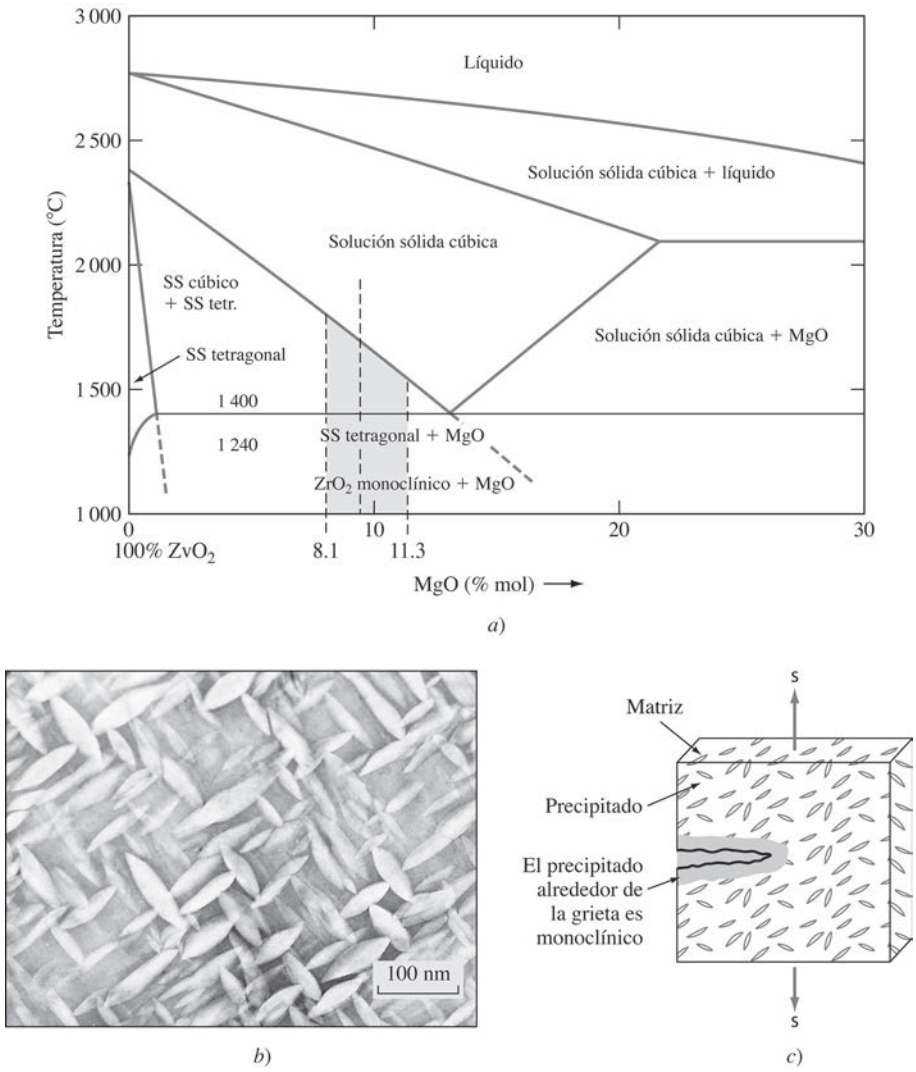
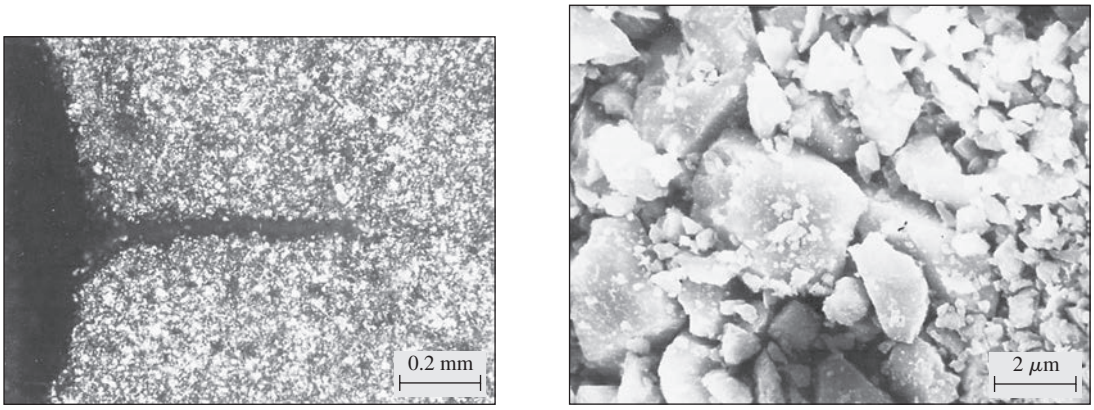


Figura 11.40

a) Diagrama de fases de la parte de alta ZrO_2 del diagrama de fases binario ZrO_2-MgO. El área sombreada representa la región usada para combinar MgO con ZrO_2 a fin de producir circonia parcialmente estabilizada.
(A. H. Heuer, "Advances in Ceramics", vol. 3, "Science and Technology of Zirconia", American Ceramic Society, 1981.)

b) Micrografía electrónica de transmisión de MgO óptimamente envejecido-ZrO_2 parcialmente estabilizado, mostrando el precipitado esferoide tetragonal achatado. Bajo la aplicación de un esfuerzo suficiente, estas partículas se transforman en su fase monoclínica con una expansión del volumen.
(Cortesía de A. H. Heuer.)

c) Diagrama esquemático que ilustra la transformación del precipitado tetragonal en la fase monoclínica alrededor de una grieta en una muestra de cerámica de ZrO_2-9 mol % MgO parcialmente estabilizada.



a) *b*)

Figura 11.41
Agrietamiento por fatiga de alúmina policristalina bajo compresión cíclica. *a*) Micrografía óptica que muestra la grieta por fatiga (el eje de compresión es vertical). *b*) Fractografía de microscopia electrónica del área de fatiga de la misma muestra, donde el modo intergranular de la falla es evidente. *[S. Suresh y J. R. Brockenbrough, Acta Metall.* **36:***1455 (1988).]*

alúmina policristalina. Una grieta recta por fatiga se produjo después de 79 000 ciclos de compresión (figura 11.41*a*). La propagación de la microgrieta a lo largo de los límites del grano condujo a la falla por fatiga intergranular final (figura 11.41*b*). Se realiza gran número de investigaciones para crear cerámicas más tenaces, con capacidad de soportar esfuerzos cíclicos para aplicarlas, por ejemplo, en rotores de turbina.

11.6.7 Materiales abrasivos cerámicos

La alta dureza de algunos materiales cerámicos los hace útiles como materiales abrasivos para cortar, pulverizar y pulir otros materiales de menor dureza. La alúmina fundida (óxido de aluminio) y el carburo de silicio son dos de los abrasivos cerámicos manufacturados que se usan más a menudo. Productos abrasivos, como hojas y discos, se producen por medio de enlace para unir partículas cerámicas individuales. Los materiales de unión incluyen cerámicas tratadas térmicamente, resinas orgánicas y cauchos. Las partículas de cerámica deben ser duras con bordes cortantes filosos. Además, el producto abrasivo debe tener cierta cantidad de porosidad para proporcionar canales por los que fluya el aire o el líquido a través de la estructura. Los granos del óxido de aluminio son más resistentes que los del carburo de silicio, pero no tan duros. Por esa razón el carburo de silicio se usa normalmente para los materiales más duros.

Al combinar óxido de circonio con óxido de aluminio, se desarrollaron abrasivos mejorados[4] con mayor resistencia, dureza y filo que el óxido de aluminio solo. Una de estas aleaciones de cerámica contiene 25 por ciento de ZrO_2 y 75 por ciento de Al_2O_3 y otra, 40 por ciento de ZrO_2 y 60 por ciento de Al_2O_3. Otra cerámica abrasiva importante es el nitruro de boro cúbico, que tiene el nombre comercial de Borazon.[5] Este

[4] Las aleaciones abrasivas de cerámica ZrO_2-Al_2O_3 fueron desarrolladas por la Norton Co., en la década de 1960.

[5] El Borazon es un producto de la General Electric Co., desarrollado en la década de 1950.

material es casi tan duro como el diamante, pero tiene mejor estabilidad que éste ante el calor.

11.7 PROPIEDADES TÉRMICAS DE LAS CERÁMICAS

En general, los materiales cerámicos, en su mayoría, tienen baja conductividad térmica debido a su fuerte enlace iónico covalente, y son buenos aislantes térmicos. En la figura 11.42 se comparan las conductividades térmicas de diversos materiales cerámicos en función de la temperatura. Por su alta resistencia térmica, los materiales cerámicos se usan como **refractarios**, que son materiales que resisten la acción de am-

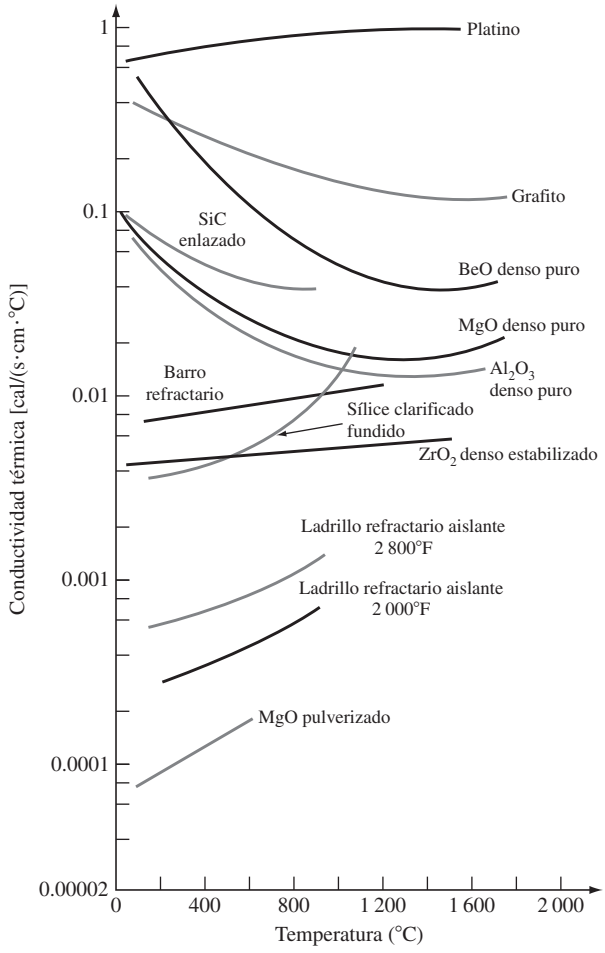


Figura 11.42
Conductividad térmica (escala logarítmica) de materiales cerámicos en un amplio intervalo de temperaturas.
(W. D. Kingery, H. K. Bowen y D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", 2a. ed., Wiley, 1976, p. 643.)

Tabla 11.8 Composiciones y aplicaciones de algunos materiales de ladrillos refractarios

	Composición (% en peso)			
	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Otros
Tipos ácidos:				
Ladrillo de sílice	95-99			
Ladrillo de barro refractario para trabajo superpesado	53	42		
Ladrillo de barro refractario para trabajo pesado	51-54	37-41		
Ladrillo de alta-alúmina	0-50	45-99+		
Tipos básicos:				
Magnesita	0.5-5		91-98	0.6-4 CaO
Magnesita-cromo	2-7	6-13	50-82	18-24 Cr_2O_3
Dolomita (quemada)			38-50	38-58 CaO
Tipos especiales:				
Circón	32			66 ZrO_2
Carburo de silicio	6	2		91 SiC

Aplicaciones de algunos refractarios:

Ladrillos refractarios para trabajo superpesado: revestimientos para calderas de fundición de aluminio, hornos rotatorios, altos hornos y cucharones para transferir metal caliente.

Ladrillo refractario para trabajo pesado: recubrimientos para hornos de cemento y cal, altos hornos e incineradores.

Ladrillos de alta-alúmina: hornos de caldera, hornos de regeneración de ácido usado, hornos de fosfatos, paredes de refinación de tanques de vidrio, hornos de negro de carbón, recubrimientos tundish de fundido continuo, recubrimientos de reactor para gasificación de carbón y hornos de coque de petróleo.

Ladrillo de sílice: recubrimientos de reactores químicos, piezas de tanques de vidrio, hornos de cerámica y hornos de coque.

Ladrillo de magnesita: recubrimiento de hornos de procesos básicos con oxígeno para elaboración de acero.

Ladrillo de circón: pavimentación del fondo de tanques de vidrio y boquillas de fundición continua.

Fuente: *Harbison-Walker Handbook of Refractory Practice,* Harbison-Walker Refractories, Pittsburgh, 1980.

bientes calientes, tanto líquidos como gaseosos. Los refractarios se usan ampliamente en las industrias de metales, productos químicos, cerámicas y vidrio.

11.7.1 Materiales cerámicos refractarios

Muchos compuestos cerámicos puros con puntos de fusión altos, como el óxido de aluminio y el óxido de magnesio, podrían usarse como materiales industriales refractarios, pero son caros y es difícil darles forma. Por eso, los refractarios industriales, en su mayoría, se hacen con mezclas de compuestos cerámicos. En la tabla 11.8 se presenta una lista de las composiciones de varios compuestos para ladrillo refractario y algunas de sus aplicaciones.

Las propiedades importantes de los materiales cerámicos refractarios son: resistencia a baja y alta temperatura, densidad volumétrica y porosidad. La mayoría de los refractarios cerámicos tienen densidades aparentes en un intervalo que va de 2.1 a 3.3 g/cm^3 (132 a 206 lb/pie^3). Los refractarios densos de baja porosidad tienen más alta resistencia a la corrosión, a la erosión y a la penetración por líquidos y gases. Sin embargo, para refractarios aislantes es deseable una alta cantidad de porosidad. Los refractarios aislantes se usan principalmente como respaldo para ladrillos o materiales refractarios de más alta densidad y refractabilidad.

Los materiales cerámicos refractarios industriales se dividen comúnmente en dos tipos: ácidos y básicos. Los refractarios ácidos se basan sobre todo en SiO_2 y Al_2O_3, y los básicos en MgO, CaO y Cr_2O_3. En la tabla 11.8 se listan las composiciones de muchos tipos de refractarios industriales y algunas de sus aplicaciones.

11.7.2 Refractarios ácidos

Los *refractarios de sílice* tienen alta refractabilidad, alta resistencia mecánica y rigidez a temperaturas cercanas a sus puntos de fusión.

Los *barros refractarios* se basan en una mezcla de barro plástico, arcilla de sílex pulverizada y grog de arcilla (de partícula gruesa). En condiciones de no cocción (verdes), estos refractarios consisten en una mezcla de partículas que van desde gruesas hasta extremadamente finas. Después de la cocción, las partículas finas forman un enlace cerámico entre las partículas más grandes.

Los *refractarios altos en alúmina* contienen de 50 a 99 por ciento de alúmina y tienen temperaturas de fusión más altas que los ladrillos de barro refractario. Se pueden usar en condiciones de horno más severas y a mayores temperaturas que los ladrillos de barro refractario, pero son más caros.

11.7.3 Refractarios básicos

Los *refractarios básicos* constan principalmente de (MgO), cal (CaO), mineral de cromo o mezclas de dos o más de estos materiales. Como grupo, los refractarios básicos tienen alta densidad aparente, alta temperatura de fusión y buena resistencia al ataque químico de escorias básicas y óxidos, pero son más caros. Los refractarios básicos contienen un alto porcentaje de magnesio (92 a 95 por ciento) y son ampliamente utilizados en recubrimientos para el proceso básico de oxígeno en la fabricación de acero.

11.7.4 Losetas cerámicas aislantes para el transbordador espacial

El desarrollo del sistema de protección térmica para el transbordador espacial es un excelente ejemplo de la tecnología de materiales moderna aplicada al diseño de ingeniería. Para que el transbordador espacial se pudiera usar en 100 misiones por lo menos, se desarrollaron nuevos materiales aislantes para fabricar losetas de cerámica.

Cerca de 70 por ciento de la superficie externa del satélite artificial está protegida del calor por medio de unas 24 000 losetas de cerámica hechas de un compuesto de fibras de sílice. En la figura 11.43 se muestra la microestructura del material de la loseta de *aislamiento superficial reutilizable para alta temperatura* (HRSI, por sus siglas en inglés) y en la figura 11.44 se indica el área de la superficie donde se une al cuerpo del orbitador. Este material tiene una densidad de sólo 4 kg/pie^3 (9 lb/pie^3) y puede soportar temperaturas hasta de 1 260°C (2 300°F). La efectividad de este material aislante se prueba por el hecho de que un técnico puede sostener una pieza de loseta cerámica después de sólo unos 10 segundos de haber sido extraída de un horno a 1 260°C (2 300°F).

11.8 VIDRIOS

Los vidrios tienen propiedades especiales que no se encuentran en otros materiales de ingeniería. La combinación de transparencia y dureza a temperatura ambiente, junto con la suficiente solidez y la excelente resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes normales, hacen que los vidrios sean indispensables en múltiples aplicaciones de ingeniería, como la construcción y los cristales para vehículos. En la industria eléctrica, el vidrio es esencial para distintos tipos de lámparas por sus propiedades aislantes y porque con él pueden hacerse recipientes herméticos al vacío. En la industria

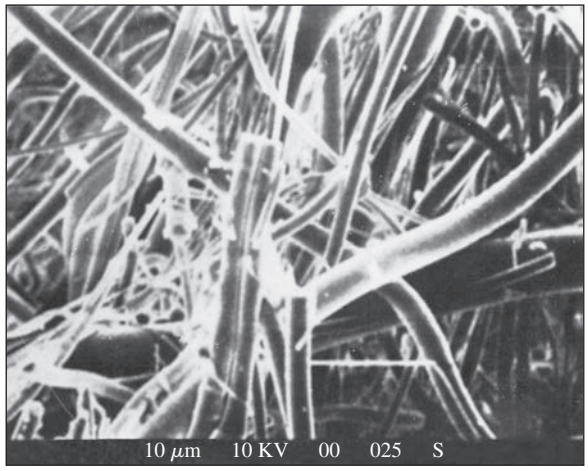


Figura 11.43
Microestructura del aislamiento superficial reutilizable LI900 para alta temperatura (material de losetas cerámicas utilizado en el transbordador espacial); su estructura contiene 99.7% de fibras de sílice puras. (Amplificación 1 200×.)
(Cortesía de Lockheed Martin Missiles and Space Co.)

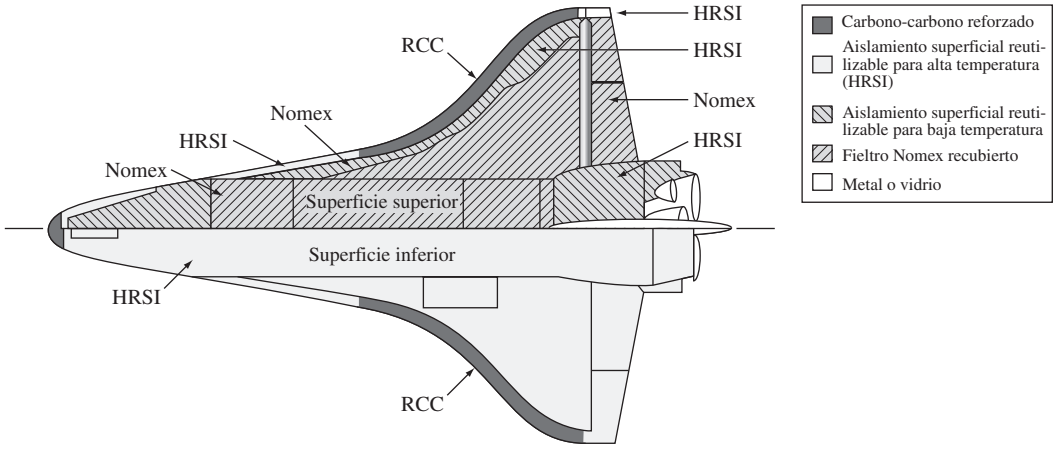


Figura 11.44
Sistemas de protección térmica del transbordador espacial.
(Cortesía de la NASA.)

electrónica se requiere también un recipiente hermético al vacío para tubos electrónicos, lo cual se obtiene con vidrio y éste ofrece además sus propiedades aislantes para fijar los conectores. La alta resistencia química del vidrio lo hace útil para aparatos de laboratorio y revestimientos de tubos resistentes a la corrosión, y para recipientes de reacciones en la industria química.

11.8.1 Definición de vidrio

El vidrio es un material cerámico fabricado con materiales inorgánicos a altas temperaturas. Sin embargo, se distingue de otras cerámicas en que sus componentes son calentados hasta que se fusionan y luego se enfrían hasta un estado rígido sin cristalización. Por tanto, el **vidrio** se puede definir como *un producto inorgánico de fusión que se ha enfriado hasta un estado rígido sin cristalización.* Una característica del vidrio es que tiene una estructura amorfa o no cristalina. Las moléculas del vidrio no están distribuidas en un orden repetitivo de largo alcance como el que existe en los sólidos cristalinos. En el vidrio, las moléculas cambian su orientación en forma aleatoria en todo el material sólido.

11.8.2 Temperatura de transición vítrea

El comportamiento de solidificación del vidrio es diferente del de un sólido cristalino, como se ilustra en la figura 11.45, la cual es una gráfica del volumen específico (recíproco de la densidad) contra la temperatura para estos dos tipos de materiales. Un líquido que forma un sólido cristalino por solidificación (por ejemplo, un metal puro) cristaliza normalmente a partir de su punto de fusión con una disminución significativa de volumen específico, como lo indica la trayectoria *ABC* en la figura 11.45. En cambio, un líquido que forma vidrio no cristaliza al enfriarse, sino que sigue una trayectoria similar a *AD* en la figura 11.45. Un líquido de este tipo se vuelve más viscoso a medida que baja su temperatura y se transforma de un estado plástico ahulado blando a un estado vítreo rígido y frágil, en un estrecho intervalo de temperaturas donde la pendiente de la curva de volumen específico contra temperatura disminuye marcadamente. El punto de intersección de las dos pendientes de esta curva define un pun-

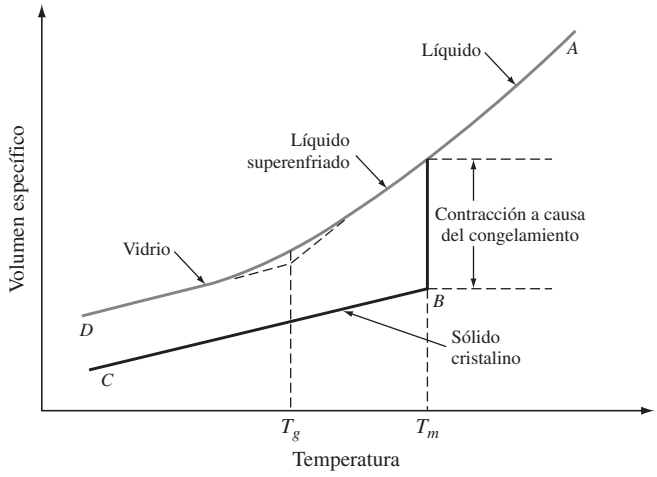


Figura 11.45
Solidificación de materiales cristalinos y vítreos (amorfos) mostrando los cambios de su volumen específico. T_g es la temperatura de transición vítrea del material vítreo. T_m es la temperatura de fusión del material cristalino.

to de transformación llamado **temperatura de transición vítrea** T_g. Este punto es sensible a la estructura, y las tasas de enfriamiento más rápidas producen valores de T_g más altos.

11.8.3 Estructura de los vidrios

Óxidos que forman vidrio La mayoría de los vidrios inorgánicos se basan en el **óxido de silicio que es formador de vidrio**. La subunidad fundamental de los vidrios a base de sílice es el tetraedro SiO_4^{4-} en el cual un átomo (ion) de silicio (Si^{4+}) del tetraedro está enlazado en forma covalente iónica a cuatro átomos (iones) de oxígeno, como se muestra en la figura 11.46*a*. En la sílice cristalina, por ejemplo, la cristobalita, el tetraedro de Si-O está unido esquina con esquina en una distribución regular, produciendo un orden de largo alcance como se idealiza en la figura 11.46*b*. En un vidrio sencillo de sílice, el tetraedro está unido esquina con esquina para formar una *red suelta* sin orden alguno de largo alcance (figura 11.46*c*).

El óxido de boro, B_2O_3, también es un óxido que forma vidrio y, por sí solo, forma subunidades que son triángulos planos con un átomo de boro ligeramente fuera del plano de los átomos de oxígeno. Sin embargo, en los vidrios de boro silicato a los que se agregan álcalis y óxidos de tierras alcalinas, los triángulos de BO_3^{3-} se pueden convertir en tetraedros de BO_4^{4-}, con cationes alcalinos o alcalinotérreos que suministran la electroneutralidad necesaria. El óxido de boro es un importante aditivo para muchos tipos de vidrios comerciales, como los borosilicatos y los vidrios de aluminoborosilicato.

Óxidos modificadores del vidrio Los óxidos que rompen la red vítrea se conocen como **modificadores de redes**. Óxidos alcalinos, como el Na_2O y el K_2O, y óxidos alcalinotérreos como el CaO y el MgO se añaden al vidrio de sílice para disminuir su viscosidad, de modo que pueda ser trabajado y conformado con más facilidad. Los átomos de oxígeno de estos óxidos penetran en las redes de sílice en puntos de unión del tetraedro y rompen la red, produciendo átomos de oxígeno con un elec-

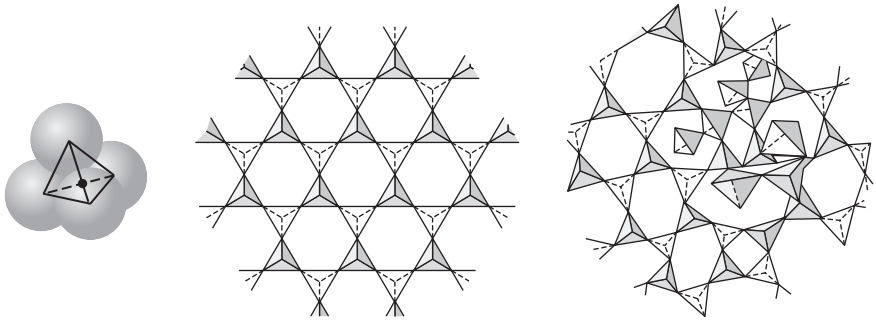


Figura 11.46
Representación esquemática de *a*) un tetraedro de silicio-oxígeno, *b*) una sílice cristalina ideal (cristobalita) en la que el tetraedro tiene un orden de largo alcance y *c*) un vidrio de sílice sencillo en el que el tetraedro no tiene un orden de largo alcance.
(Cortesía de Corning Glass Works.)

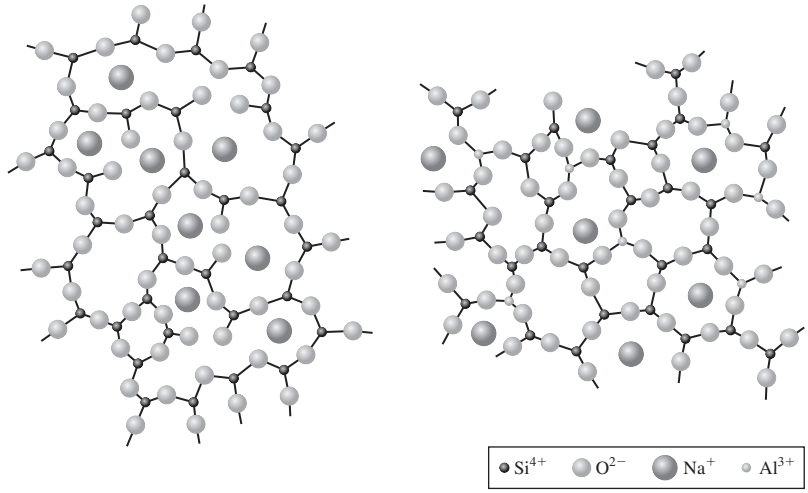


Figura 11.47
a) Vidrios de red modificada (vidrio de soda-cal); obsérvese que los iones metálicos (Na^+) no forman parte de la red. *b*) Vidrio de óxido intermedio (alúmina-sílice); obsérvese que los pequeños iones metálicos (Al^{3+}) forman parte de la red.
(O. H. Wyatt y D. Dew-Hughes, "Metals, Ceramics, and Polymers", Cambridge, 1974, p. 263.)

trón no compartido (figura 11.47*a*). Los iones Na^+ y K^+ que provienen de Na_2O y del K_2O no entran en la red, pero permanecen como iones metálicos enlazados iónicamente en los intersticios de la red. Al llenar algunos de los intersticios, esos iones provocan la cristalización del vidrio.

Óxidos intermedios en vidrios Algunos óxidos no tienen la capacidad de formar una red vítrea por sí mismos, pero pueden unirse a una red ya existente. Estos óxidos se conocen como **óxidos intermedios**. Por ejemplo, el óxido de aluminio, Al_2O_3, puede entrar a la red de sílice como AlO_4^{4-} tetraédrico, reemplazando algunos de los grupos SiO_4^{4-} (figura 11.47*b*). Sin embargo, como la valencia del Al es $+3$, en vez de $+4$ como se requiere para el tetraedro, los cationes alcalinos deben suministrar el resto de los electrones necesarios para producir neutralidad eléctrica. Los óxidos intermedios se añaden al vidrio de sílice para obtener propiedades especiales. Por ejemplo, los vidrios de aluminosilicato pueden alcanzar temperaturas más altas que el vidrio común. El óxido de plomo es otro óxido intermedio que se añade a algunos vidrios de sílice. Dependiendo de la composición del vidrio, los óxidos intermedios pueden actuar a veces como modificadores de red y también pueden formar parte de la red del vidrio.

11.8.4 Composición de diversos vidrios

Las composiciones de algunos tipos importantes de vidrio se listan en la tabla 11.9 junto con algunas observaciones sobre sus propiedades y aplicaciones especiales. El vidrio de sílice fundido, que es el vidrio más importante de un solo componente, tiene una

Tabla 11.9 Composición de algunos vidrios

Vidrio	SiO_2	Na_2O	K_2O	CaO	B_2O_3	Al_2O_3	Otros	Observaciones
1. Sílice (fundido)	99.5+							Difícil de fundir y fabricar, pero puede usarse a 1 000°C. Muy baja expansión y alta resistencia al choque térmico.
2. Sílice 96%	96.3	<0.2	<0.2		2.9	0.4		Fabricado de vidrio de borosilicato relativamente blando; con calor se separan las fases de SiO_2 y B_2O_3; con calor se consolidan los poros.
3. Soda-cal: lámina de vidrio	71-73	12-14		10-12		0.5-1.5	MgO, 1-4	Se fabrica con facilidad. Se usa mucho en calidades que varían ligeramente, ya sea para ventanas, recipientes o bombillas eléctricas.
4. Silicato de plomo: uso eléctrico	63	7.6	6	0.3	0.2	0.6	PbO, 21 MgO, 0.2	Fácil de fundir y fabricar con buenas propiedades eléctricas.
5. Alto en plomo	35		7.2				PbO, 58	Alto en plomo, absorbe rayos X; por su alta refracción se usa en lentes acromáticos. Vidrio cristal decorativo.
6. Borosilicato: baja expansión	80.5	3.8	0.4		12.9	2.2		Baja expansión, buena resistencia al choque térmico, y buena estabilidad. química. Se usa mucho en la industria química.
7. Baja pérdida eléctrica	70.0		0.5		28.0	1.1	PbO, 1.2	Baja pérdida dieléctrica.
8. Aluminoborosilicato: aparato estándar	74.7	6.4	0.5	0.9	9.6	5.6	B_2O, 2.2	Con más alúmina y menos óxido bórico mejora la durabilidad química.
9. Bajo en álcali (vidrio E)	54.5	0.5		22	8.5	14.5		Se usa mucho en fibras para compuestos resinosos vítreos.
10. Aluminosilicato	57	1.0		5.5	4	20.5	MgO, 12	Alta resistencia a la temperatura, baja expansión.
11. Vidrio-cerámica	40-70					10-35	MgO, 10-30 TiO_2, 7-15	Cerámica cristalina hecha por desvitrificación del vidrio. Fácil de fabricar (como vidrio), buenas propiedades. Diversos vidrios y catalizadores.

Fuente: O. H. Wyatt y D. Dew-Hughes, *Metals, Ceramics, and Polymers,* Cambridge, 1974, p. 261.

alta transmisión espectral y no es susceptible al daño por radiación, que es la causa del oscurecimiento de otros vidrios. Por tanto, es el vidrio ideal para ventanas de vehículos espaciales, ventanas de túneles de viento y sistemas ópticos en dispositivos espectrofotométricos. Sin embargo, el vidrio de sílice resulta difícil de procesar y es caro.

Vidrio de soda-cal El vidrio que se produce más comúnmente es el vidrio de soda-cal, que representa cerca de 90 por ciento de todo el vidrio producido. La composición básica de este vidrio es 71 a 73 por ciento de SiO_2, 12 a 14 por ciento de Na_2O y 10 a 12 por ciento de CaO. El Na_2O y el CaO hacen que el punto de reblandecimiento de este vidrio descienda de 1 600 a 730°C, aproximadamente, de modo que el vidrio de soda-cal es más fácil de conformar. Se le añade de 1 a 4 por ciento de MgO para evitar la desvitrificación y de 0.5 a 1.5 por ciento de Al_2O_3 para incrementar la durabilidad. El vidrio de soda-cal se usa en vidrios planos, recipientes, utensilios prensados y soplados, y en productos de iluminación cuando no se requiere alta durabilidad química y alta resistencia al calor.

Vidrios de borosilicato La sustitución de los óxidos alcalinos por óxido bórico en la red vítrea de sílice produce un vidrio de menor expansión. Cuando el B_2O_3 entra en la red de sílice, debilita su estructura y disminuye considerablemente el punto de reblandecimiento del vidrio de sílice. El efecto debilitador se atribuye a la presencia de boros planares de tres coordenadas. El vidrio de borosilicato (vidrio Pyrex) se usa en equipo de laboratorio, tuberías, utensilios para horno y unidades herméticas de faros delanteros.

Vidrios de plomo El óxido de plomo suele ser un modificador de la red de sílice, pero también puede actuar como formador de redes. Los vidrios de plomo con alto contenido de óxido de plomo tienen bajo punto de fusión y se usan en vidrios protectores para soldar-sellar. Los vidrios de alto contenido en plomo también se usan como protectores de radiación de alta energía y se aplican en ventanas de radiación, fundas de lámparas fluorescentes y tubos de televisor. Por sus altos índices de refracción, los vidrios de plomo se usan en algunas lentes ópticas y en vidrios con propósitos decorativos.

11.8.5 Deformación viscosa de vidrios

El vidrio se comporta como un líquido viscoso (superenfriado) por arriba de su temperatura de transición vítrea. Bajo tensión, los grupos de átomos (iones) de sílice pueden deslizarse unos sobre otros, permitiendo la deformación permanente del vidrio. Las fuerzas de enlace interatómico resisten la deformación por arriba de la temperatura de la transición vítrea, pero no logran evitar el flujo viscoso del vidrio si el esfuerzo aplicado es suficientemente alto. A medida que la temperatura del vidrio aumenta progresivamente por arriba de su temperatura de transición vítrea, la viscosidad del vidrio disminuye y el flujo viscoso se presenta con mayor facilidad. El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de un vidrio concuerda con una ecuación tipo Arrhenius, salvo que el signo del término exponencial es positivo en vez de negativo, como suele ser (es decir, para el coeficiente de difusión, la ecuación tipo Arrhenius es $D = D_0e^{(-Q/RT)}$). La ecuación que relaciona la viscosidad con la temperatura para el flujo viscoso de un vidrio es

$$\eta^* = \eta_0 e^{+Q/RT} \tag{11.2}$$

---

*η = Letra griega eta.

[6] 1 P (poise) = 1 dina · s/cm^2; 1 Pa · s (pascal-segundo) = 1 N · s/m^2; 1 P = 0.1 Pa · s.

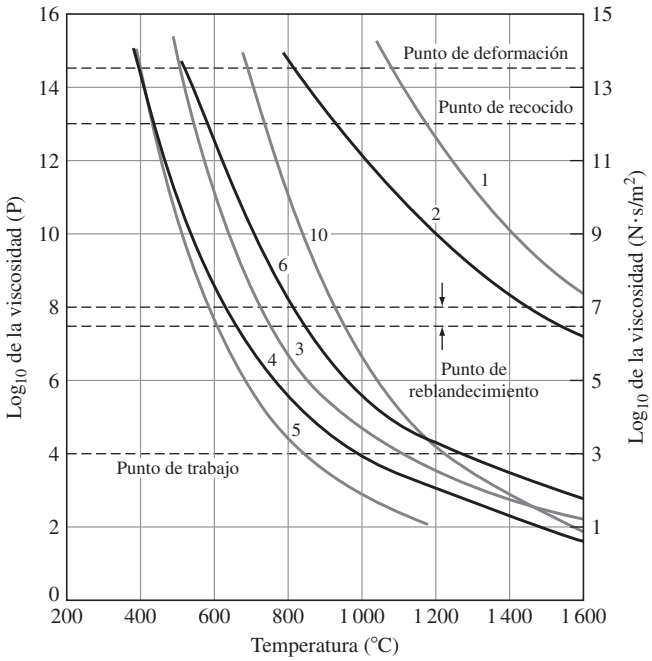


Figura 11.48
Efecto de la temperatura sobre las viscosidades de diversos tipos de vidrios. Los números incluidos en las curvas indican las composiciones que aparecen en la tabla 10.11.
(O. H. Wyatt y D. Dew-Hughes, "Metals, Ceramics, and Polymers", Cambridge, 1974, p. 259.)

donde η = viscosidad del vidrio, P o Pa · s;[6] η_0 = constante preexponencial, P o Pa · s; Q = energía de activación molar para flujo viscoso; R = constante universal de gas molar, y T = temperatura absoluta. En el problema de ejemplo 11.10 se muestra cómo se puede determinar con esta ecuación el valor de la energía de activación del flujo viscoso de un vidrio, usando datos de viscosidad-temperatura.

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de algunos tipos comerciales de vidrios se muestra en la figura 11.48. Para la comparación de vidrios se usan diversos puntos de referencia de la viscosidad que aparecen indicados mediante líneas horizontales en la figura 11.48. Éstos son los puntos de trabajo, reblandecimiento, recocido y deformación. Sus definiciones son:

1. Punto de trabajo: viscosidad = 10^4 poises (10^3 Pa · s). A esta temperatura se pueden realizar operaciones de fabricación de vidrio.

2. Punto de reblandecimiento: viscosidad = 10^8 poises (10^7 Pa · s). A esta temperatura el vidrio fluye a una tasa considerable bajo su propio peso. Sin embargo, este punto no se puede definir con una viscosidad precisa porque depende de la densidad y tensión superficial del vidrio.

3. Punto de recocido: viscosidad = 10^{13} poises (10^{12} Pa · s). Los esfuerzos internos se pueden mitigar a esta temperatura.

4. Punto de deformación: viscosidad = $10^{14.5}$ poises ($10^{13.5}$ Pa · s). Por abajo de esta temperatura, el vidrio es rígido y la relajación de esfuerzos sólo se presenta a una tasa lenta. El intervalo entre los puntos de recocido y deformación se considera comúnmente como el intervalo de recocido de un vidrio.

Los vidrios se funden generalmente a una temperatura que corresponde a la viscosidad de unos 10^2 poises (10 Pa · s). Durante la formación, la viscosidad de los vidrios se compara cualitativamente. El *vidrio duro* tiene un punto de reblandecimiento alto, mientras que el *vidrio blando* tiene un punto de reblandecimiento más bajo. En el *vidrio largo* la diferencia de temperatura entre sus puntos de reblandecimiento y deformación es grande. O sea que el vidrio largo se solidifica más lentamente que el *vidrio corto* a medida que la temperatura disminuye.

PROBLEMA DE EJEMPLO 11.10

Un vidrio con 96 por ciento de sílice tiene una viscosidad de 10^{13} P en su punto de recocido de 940°C y una viscosidad de 10^8 P en su punto de reblandecimiento de 1 470°C. Calcule la energía de activación en kilojoules por mol para el flujo viscoso de este vidrio en este intervalo de temperaturas.

■ **Solución**

$$\text{Punto de recocido del vidrio} = T_{ap} = 940°\text{C} + 273 = 1\,213\ \text{K} \qquad \eta_{ap} = 10^{13}\ \text{P}$$

$$\text{Punto de reblandecimiento del vidrio} = T_{sp} = 1\,470°\text{C} + 273 = 1\,743\ \text{K} \qquad \eta_{sp} = 10^{8}\ \text{P}$$

$$R = \text{constante de los gases} = 8.314\ \text{J/(mol} \cdot \text{K)} \qquad Q = ?\ \text{J/mol}$$

Usando la ecuación 10.5, $\eta = \eta_0 e^{Q/RT}$,

$$\eta_{ap} = \eta_0 e^{Q/RT_{ap}} \qquad \eta_{sp} = \eta_0 e^{Q/RT_{sp}}$$

$$\text{o bien,} \quad \frac{\eta_{ap}}{\eta_{sp}} = \exp\left[\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T_{ap}} - \frac{1}{T_{sp}}\right)\right] = \frac{10^{13}\ \text{P}}{10^{8}\ \text{P}} = 10^5$$

$$10^5 = \exp\left[\frac{Q}{8.314}\left(\frac{1}{1213\ \text{K}} - \frac{1}{1743\ \text{K}}\right)\right]$$

$$\ln 10^5 = \frac{Q}{8.314}(8.244 \times 10^{-4} - 5.737 \times 10^{-4}) = \frac{Q}{8.314}(2.507 \times 10^{-4})$$

$$11.51 = Q(3.01 \times 10^{-5})$$

$$Q = 3.82 \times 10^5\ \text{J/mol} = 382\ \text{kJ/mol} \blacktriangleleft$$

11.8.6 Métodos de formación para vidrios

Los productos de vidrio se hacen calentando primero el vidrio a alta temperatura para producir un líquido viscoso y luego moldearlo, estirarlo o enrollarlo para darle la forma deseada.

Formación de láminas y placas de vidrio Cerca del 85 por ciento del vidrio plano que se produce en Estados Unidos se hace por el proceso de **vidrio flotado**, en el cual una tira de vidrio sale del horno de fundido y flota sobre la superficie de un baño de estaño fundido (figura 11.49). La tira de vidrio se enfría mientras pasa sobre el estaño fundido, en una atmósfera controlada químicamente (figura 11.49).

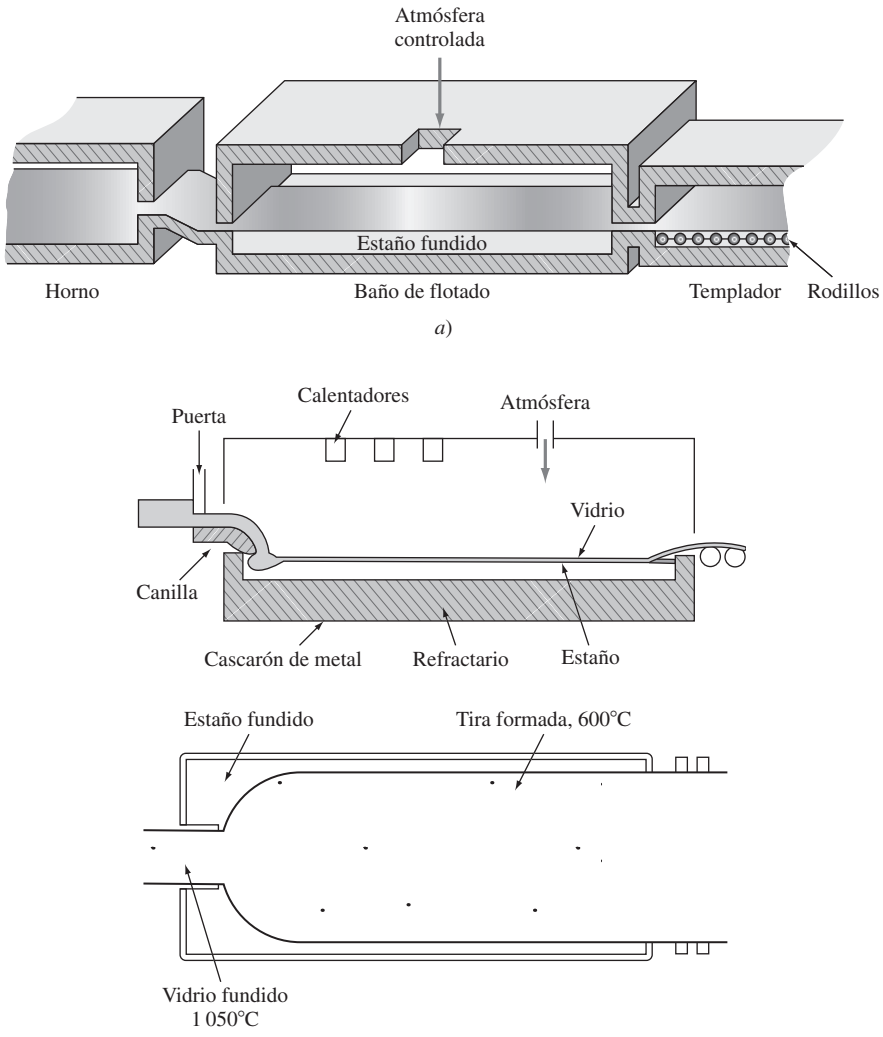


Figura 11.49
a) Diagrama del proceso de vidrio flotado.
(D. C. Boyd y D. A. Thompson, "Glass", vol. II: "Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology", 3a. ed., Wiley, 1980, p. 862.)
b) Vistas esquemáticas, lateral y superior, del proceso de vidrio flotado.

Cuando sus superficies están lo suficientemente duras, la placa de vidrio se saca del horno sin ser marcada por los rodillos y pasa por un largo horno de recocido llamado *templador*, donde se eliminan los esfuerzos residuales.

Soplado, prensado y moldeado de vidrio Los artículos hondos, como botellas, jarras y cubiertas de bombillas luminosas, se moldean generalmente por soplado, haciendo que el aire obligue al vidrio fundido a adaptarse a los moldes (figura 11.50).

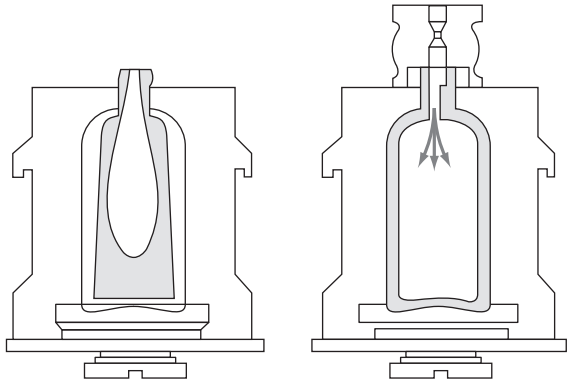


Figura 11.50
a) Etapas de recalentamiento y *b*) soplado final de un proceso de soplado de vidrio a máquina.
(W. Giegerich y W. Trier, "Glass Machines Construction and Operation of Machines for the Forming of Hot Glass", Springer-Verlag, 1969.)

Los artículos planos, como lentes ópticos y de faros herméticos se fabrican con un émbolo que presiona el vidrio fundido contenido en un molde.

Se pueden fabricar muchos artículos fundiendo el vidrio en un molde abierto. Se elaboró un gran espejo de telescopio de 6 m de diámetro vaciando vidrio de borosilicato. Los artículos en forma de embudo, como los tubos de rayos catódicos para televisor, se moldean por vaciado centrifugado. Pequeñas cantidades de vidrio fundido procedentes de un alimentador se introducen por goteo en un molde giratorio que obliga al vidrio a fluir hacia arriba, con lo cual se forma una pared vítrea de un grosor bastante uniforme.

11.8.7 Vidrio templado

Este tipo de vidrio se endurece por enfriamiento rápido de aire en la superficie del vidrio después que ha sido calentado hasta casi su punto de reblandecimiento. La superficie del vidrio se enfría primero y luego se contrae, mientras que el interior está caliente y se reajusta al cambio dimensional con poco esfuerzo (figura 11.51*a*). Cuando el interior se enfría y se contrae, las superficies son rígidas y así se crean esfuerzos de tensión en el interior del vidrio y esfuerzos de compresión sobre las superficies (figuras 11.51*b* y 11.52). Este tratamiento de "templado" aumenta la resistencia del vidrio porque los esfuerzos de tensión aplicados deben superar los esfuerzos de compresión sobre la superficie antes de que se presente una fractura. El vidrio templado tiene mayor resistencia al impacto que el vidrio recocido, y es aproximadamente cuatro veces más fuerte que éste. Las ventanillas laterales de los automóviles y los vidrios de seguridad para puertas son artículos templados térmicamente.

11.8.8 Vidrio reforzado químicamente

La resistencia del vidrio se puede incrementar con tratamientos químicos especiales. Por ejemplo, si un vidrio de aluminosilicato de sodio se sumerge en un baño de nitrato

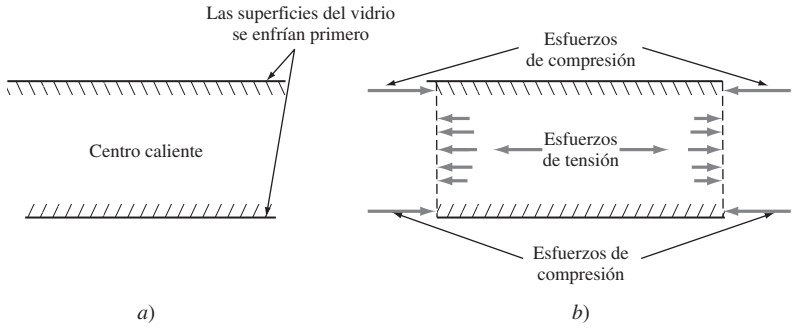


Figura 11.51
Sección transversal de vidrio templado *a*) después que la superficie se ha enfriado desde una temperatura alta hasta casi la temperatura de reblandecimiento del vidrio y *b*) después que el centro se ha enfriado.

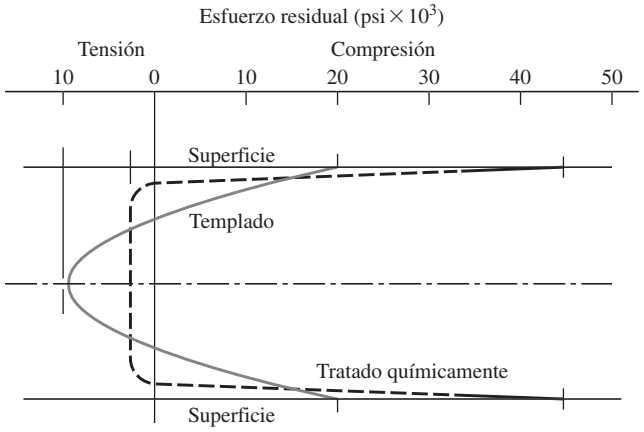


Figura 11.52
Distribución de esfuerzos residuales a través de las secciones de vidrio **templadas térmicamente** y **reforzadas químicamente**.
(E. B. Shand, "Engineering Glass", vol. 6: "Modern Materials", Academic, 1968, p. 270.)

de potasio a una temperatura aproximadamente 50°C por debajo de su punto de fatiga (~500°C) durante un lapso de 6 a 10 h, los iones de sodio que están cerca de la superficie del vidrio y que son más pequeños, son reemplazados por iones de potasio más grandes. La introducción de los iones de potasio más grandes en la superficie del vidrio produce esfuerzos de compresión en la superficie y los correspondientes esfuerzos de tensión en el centro. Este proceso de templado químico puede usarse en secciones transversales más delgadas que en el caso del templado térmico porque la capa de compresión es mucho más delgada, como se muestra en la figura 11.52. El vidrio reforzado químicamente se usa en ventanillas de aviones supersónicos y lentes oftálmicas.

11.9 RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS E INGENIERÍA DE SUPERFICIES

La superficie de un componente es susceptible a las interacciones mecánicas (fricción y desgaste), químicas (corrosión), eléctricas (conductividad o aislamiento), ópticas (reflectancia) y térmicas (daños por alta temperatura). En consecuencia, todo diseñador de cualquier campo de la ingeniería debe considerar la calidad y la protección de la superficie de un componente como un importante criterio de diseño, es decir, de ingeniería de superficies. Un método posible para proteger la superficie de un componente consiste en la aplicación de recubrimientos. Los materiales de recubrimiento pueden ser metálicos, como el recubrimiento electrolítico con cromo para molduras de automóvil; poliméricos, como las pinturas resistentes a la corrosión, y también cerámicos. Diversos materiales cerámicos se usan como recubrimientos de aplicaciones sometidas a ambientes de alta temperatura o en las que se debe considerar el desgaste prematuro. Los recubrimientos cerámicos imparten características físicas al material de sustrato que este mismo no posee. Estos recubrimientos pueden transformar la superficie de un sustrato haciéndola químicamente inerte, resistente a la abrasión, de baja fricción y fácil de limpiar, dentro de cierto intervalo de temperaturas. También pueden impartir resistencia eléctrica y evitar la difusión de hidrógeno (una de las mayores causas de daños en muchos metales). Los ejemplos de materiales de recubrimiento cerámico incluyen vidrios, óxidos, carburos, siliciuros, boruros y nitruros.

11.9.1 Vidrios de silicato

Los recubrimientos de vidrio de silicato tienen amplias aplicaciones industriales. Un recubrimiento vítreo aplicado a 1) un sustrato cerámico se denomina **vidriado**, 2) a una superficie metálica se le llama **esmalte de porcelana** y 3) a un sustrato vítreo se le denomina **esmalte vítreo**. Estos recubrimientos se usan en su mayoría por razones estéticas, pero también proporcionan protección contra elementos del medio ambiente, en gran parte porque disminuyen su permeabilidad. Entre las aplicaciones específicas se incluyen tubos de escape de motores, calentadores de ambientes y radiadores. Estos recubrimientos se aplican mediante técnicas de aspersión o inmersión. La superficie de un componente que va a ser vidriada o esmaltada tiene que estar limpia (libre de partículas y aceite) y las esquinas afiladas deben ser redondeadas para asegurar la adecuada adhesión del recubrimiento (es decir, para evitar el descascarillado).

11.9.2 Óxidos y carburos

Los recubrimientos de óxido protegen contra la oxidación y el daño a temperaturas elevadas, mientras que los recubrimientos de carburo (debido a su dureza) se usan en aplicaciones donde el desgaste y las cualidades de sellado son importantes. Por ejemplo, la circonia (ZrO_2) se aplica como recubrimiento a las partes móviles de una máquina. La circonia protege el sustrato metálico (aleaciones de Al o Fe) contra daños por altas temperaturas. El recubrimiento suele aplicarse con técnicas a la flama o por aspersión térmica. En esta técnica, las partículas de cerámica (óxido o carburo) se calientan e impulsan hacia la superficie del sustrato. En la figura 11.53 se muestra un ejemplo de un proceso de ese tipo, en el que un rodillo de laminación para papel está recubierto de

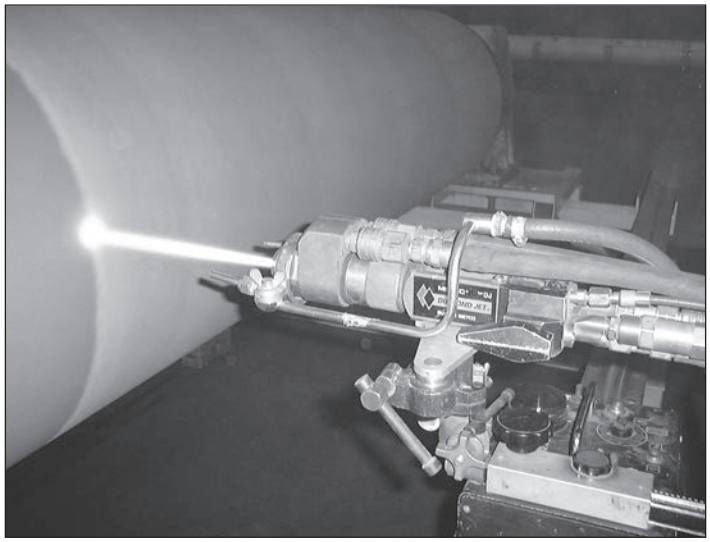


Figura 11.53
Recubrimiento por aspersión térmica con carburo de tungsteno-cromo cobalto (WC/10Co4Cr) sobre un rodillo para la industria manufacturera de papel.
(Gordon England www.gordonengland.co.uk/)

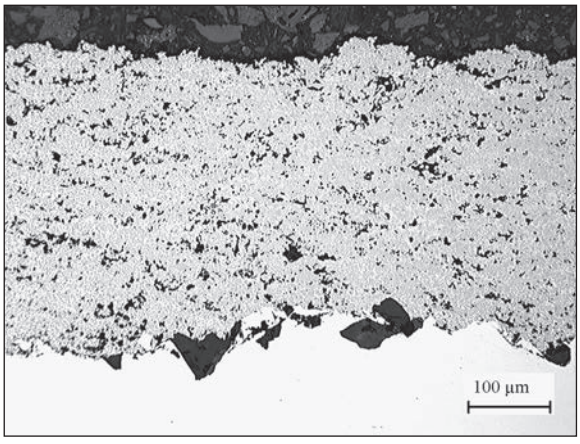


Figura 11.54
Microestructura del recubrimiento de carburo de tungsteno-cromo cobalto sobre el sustrato.
[Cortesía de TWI Ltd. (The Welding Institute, Granta Park, Great Abington, Cambridge, UK.)]

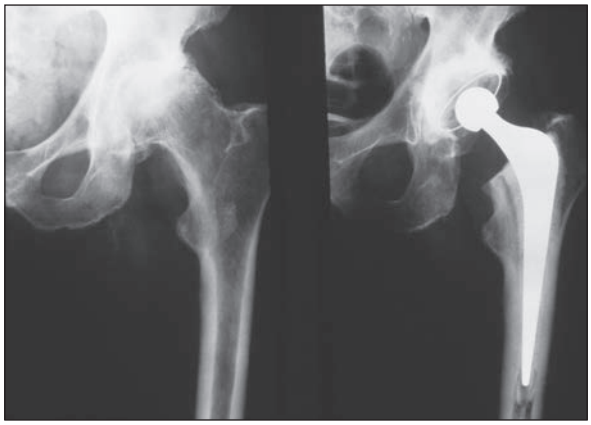
carburo de tungsteno-cromo cobalto. La microestructura del recubrimiento, cuyo grosor es de cerca de 100 micrones, se ilustra en la figura 11.54. El recubrimiento protector de este rodillo en las industrias procesadoras de papel es importante por la naturaleza altamente ácida o básica de la pulpa. Las cerámicas son los únicos materiales que ofrecen resistencia a la abrasión y la corrosión en esos medios adversos. Sin embargo, cualquier agrietamiento en la capa frágil del recubrimiento que llegue al sustrato crecerá a partir de estos puntos y finalmente provocará una falla en el componente.

11.10 CERÁMICAS EN APLICACIONES BIOMÉDICAS

En capítulos anteriores se analizó la aplicación de materiales metálicos y poliméricos a diversos dispositivos e instrumentos médicos. Las cerámicas también tienen uso extensivo en el campo biomédico, como en implantes ortopédicos, lentes, utensilios de laboratorio, termómetros y, de modo más importante, en aplicaciones dentales. Los factores que hacen de los biomateriales cerámicos excelentes candidatos para aplicaciones biomédicas son su biocompatibilidad, resistencia a la corrosión, alta dureza, resistencia al desgaste en aplicaciones donde hay articulación de superficies (materiales de prótesis dentales e implantes de cadera y rodilla) y baja fricción. Además, la principal ventaja de algunos biomateriales cerámicos es que se unen bien al hueso (unión implante-tejido), lo cual es importante en muchas aplicaciones ortopédicas y dentales. Considere la situación en la que un soporte femoral (en una operación de reemplazo de cadera) o un componente tibial (en una operación de reemplazo de rodilla) está en contacto directo con el hueso que se va a sustituir (material óseo dentro de la superficie inmediata); el problema de la unión implante-tejido es sin duda un tema importante para conservar la estabilidad de la unión (es decir, que la prótesis no se afloje). Sin embargo, con frecuencia los implantes se aflojan, lo cual resulta doloroso y en muchos casos requiere costosas operaciones secundarias para corregir la falla. Este problema es importante, tanto desde el punto de vista del costo de la atención de la salud como de la calidad de vida del paciente. En los siguientes párrafos se abordará la aplicación de las cerámicas a diversas áreas del campo biomédico, incluso la fijación de implantes en tejidos.

11.10.1 La alúmina en implantes ortopédicos

La alúmina de alta pureza tiene una excelente resistencia a la corrosión, alta resistencia al desgaste, alta solidez y es biocompatible. Debido a estas características ha aumentado su uso como el material preferido para reemplazos de cadera. En la cirugía de reemplazo total de cadera, la cabeza del fémur dañada o enferma y el hueco en el que se articula, la cavidad *acetabular* (CA), son reemplazados con prótesis artificiales. En la figura 11.55*a* se ilustra la cadera de un paciente dañada por la artritis avanzada, como se observa por la forma anormal de la cabeza del fémur y la cavidad deformada; ambas son reemplazadas por prótesis artificiales como se muestra en la figura 11.55*b*. La cavidad artificial CA consta de una base metálica y un inserto cóncavo en el cual se une la articulación femoral (figura 11.56). La base metálica que contiene al inserto cóncavo se fija con tornillos al hueso de la pelvis. Como se dijo al principio del capítulo 10, el componente de la cabeza femoral se hace generalmente con aleaciones de cobalto-cromo y la cavidad CA se hace de polietileno de peso molecular sumamente alto (metal sobre polímero). Lamentablemente, esta combinación de materiales produce desgas-



a) *b*)

Figura 11.55
a) Una cadera mostrando daños artríticos extensos *b*) La misma cadera después del reemplazo total de cadera (RTC).
(© Princess Margaret Rose Orthopedic Hospital/Photo Researchers, Inc.)

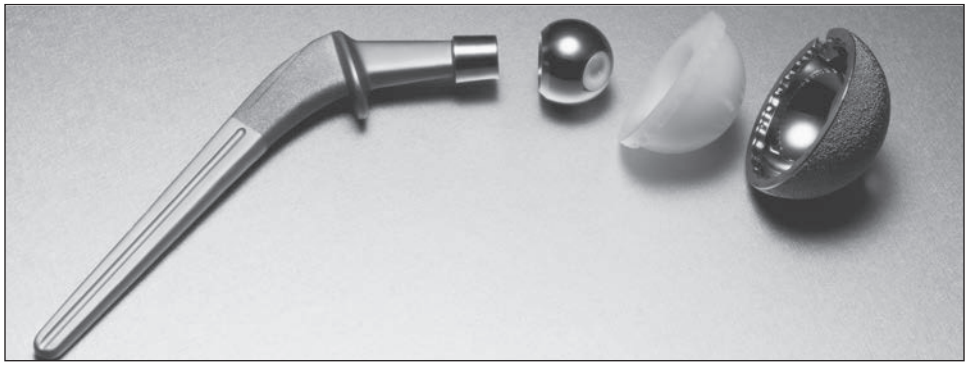


Figura 11.56
Componentes de prótesis totales de cadera, incluyendo el vástago con una cabeza femoral de alúmina, una cavidad CA de alúmina y una base metálica para dicha cavidad.
(PhotosDisc/Getty Images.)

te en la superficie del polietileno y finalmente la prótesis se afloja (véase el principio del capítulo 10). Para evitar la formación de partículas desgastadoras y, por tanto, que se afloje la prótesis, los fabricantes usan alúmina tanto para la cabeza femoral como para la cavidad CA, como se muestra en la figura 11.56 (cerámica sobre cerámica) en virtud de la alta resistencia al desgaste y la dureza superficial de la alúmina. Las notables propiedades de ésta dependen de su tamaño de grano y de su pureza. En aplicaciones de implante ortopédico, la pureza debe ser mayor de 99.8 por ciento y el tamaño del

grano tiene que estar en un intervalo de 3 a 6 μm. Además, las superficies de articulación (esfera sobre cavidad) deben tener un alto grado de simetría y tolerancias estrictas, lo cual se logra esmerilando y puliendo sus componentes para que la cabeza y la cavidad se acoplen entre sí. El coeficiente de fricción de una cadera de cerámica sobre cerámica puede ser casi igual al de una cadera normal, por lo cual la formación de residuos de desgaste en ella es 10 veces menor que en las combinaciones de metal sobre polímero. El efecto colateral negativo de las caderas de cerámica sobre cerámica es la protección contra el esfuerzo (véase la sección 10.12) a causa del alto módulo de elasticidad de la cerámica. La **protección contra el esfuerzo** puede ocasionar una pérdida de masa ósea y el aflojamiento de la prótesis en pacientes de edad avanzada. Por tanto, para esos pacientes, los reemplazos de cadera de metal sobre polímero pueden ser una mejor opción porque ofrecen una protección contra el esfuerzo reducida.

11.10.2 La alúmina en implantes dentales

Un implante dental funciona como una raíz artificial anclada quirúrgicamente al hueso de la mandíbula. La raíz artificial puede entonces servir de apoyo a un reemplazo dental o a una corona, como se muestra en la figura 11.57. Aunque el titanio ha sido el material preferido para implantes dentales por su compatibilidad y bajo módulo de elasticidad, la alúmina se está utilizando más a menudo para esta aplicación. La corona se hace generalmente de porcelana, que también es un material cerámico (véase la sección 11.5), aunque también puede hacerse de metales como plata y oro.

11.10.3 Conectividad de implantes cerámicos y tejidos

En las operaciones en que el implante está en contacto directo con el hueso, como se muestra en las figuras 11.55*b* y 11.57, su estabilidad depende de la reacción que provoque en el tejido que lo rodea. En general, se pueden observar cuatro tipos de respuestas del tejido que rodea a un implante: una respuesta *tóxica* en la que muere el tejido en torno al implante; una respuesta *biológicamente inactiva* en la que alrededor del implante se forma un tejido fibroso delgado; una respuesta bioactiva en la cual se forma

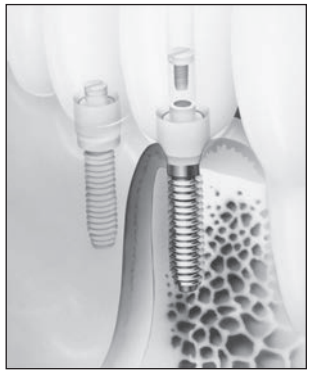


Figura 11.57
Componentes de un implante dental.
(© Custom Medical Stock Photo)

un hueso interfacial entre el hueso y la prótesis; y una respuesta de *resorción* (disolución) en la que el tejido circundante reemplaza al material de implante o algunas porciones de él. A este respecto, los implantes de cerámica (tanto para aplicaciones ortopédicas como dentales) pueden ser clasificados como casi inertes (tipo I), porosos (tipo II), bioactivos (tipo III) o reabsorbibles (tipo IV). La alúmina se clasifica como una biocerámica tipo I por sus características casi inertes. Así pues, los implantes de alúmina provocan la formación de un tejido fibroso delgado que es aceptable en situaciones donde el implante se fija firmemente y está sometido a compresión, como en los implantes dentales. Sin embargo, en situaciones donde la interfase implante-tejido está sometida a carga, como cuando se presenta el movimiento interfacial, por ejemplo en los implantes ortopédicos, la región fibrosa aumenta de grosor y el implante se afloja. En estas condiciones, las biocerámicas tipo II, como la alúmina porosa y los fosfatos de calcio, pueden servir como andamiaje o puente para la formación ósea. El material óseo crece en los poros disponibles de la cerámica (osteoconductividad) y proporciona cierto apoyo para soportar la carga. En estos materiales, el tamaño del poro debe ser mayor de 100 μm para facilitar el crecimiento del tejido vascular en los poros, permitiendo así el aporte de sangre a las células recién formadas. Las biocerámicas microporosas se usan específicamente en situaciones donde el soporte de carga no es el principal requisito debido a su reducida resistencia a causa de la porosidad. Las biocerámicas tipo III o cerámicas bioactivas son las que promueven y facilitan la formación de una unión entre el material del implante y el tejido circundante. Estos materiales desarrollan una interfase adherente que es muy fuerte y puede soportar una carga. Los vidrios que contienen SiO_2, Na_2O, CaO y P_2O_5 fueron los primeros materiales que mostraron propiedades de bioactividad. Esos vidrios difieren del vidrio convencional de soda-cal en las proporciones de sus componentes: menos de 60% mol de sílice, alto contenido de Na_2O y CaO y alta relación de CaO respecto al P_2O_5. Estas composiciones específicas permiten una alta reactividad de la superficie del implante y, por tanto, la unión al hueso en un medio acuoso. Finalmente, las biocerámicas tipo IV o cerámicas reabsorbibles son las que se degradan durante un periodo y son reemplazadas por el material óseo. El fosfato tricálcico, $Ca_3(PO_4)_2$, es un ejemplo de una cerámica reabsorbible. Los desafíos que implica el uso de estos materiales, son: 1) asegurar que la interfase implante-hueso permanezca fuerte y estable durante el periodo de degradación y reparación y 2) acoplar la tasa de resorción con la tasa de reparación. Aún se requiere mucha investigación y desarrollo para aplicar estos materiales con un desempeño óptimo; sin embargo, es obvio que los materiales cerámicos son fuertes candidatos en casos donde los implantes están en contacto directo con tejidos humanos.

11.11 NANOTECNOLOGÍA Y CERÁMICA

Considerando el intervalo y la variedad de las aplicaciones de los materiales cerámicos, se hace evidente que su potencial no se puede aprovechar plenamente por una desventaja importante que es su naturaleza frágil y, por tanto, su baja tenacidad. Las cerámicas nanocristalinas pueden reducir esta debilidad inherente de estos materiales. En los siguientes párrafos se intenta describir lo más novedoso en la producción de cerámicas nanocristalinas.

Las cerámicas nanocristalinas se producen mediante las técnicas comunes de metalurgia de polvos descritas en la sección 11.4. La diferencia es que el polvo inicial está en el intervalo nanométrico, pues son menores de 100 nm. Sin embargo, los polvos

de cerámica nanocristalina tienden a unirse entre sí, química o físicamente, para formar partículas más grandes llamadas *aglomerados* o *agregados.* Los polvos aglomerados, aun cuando su tamaño sea de nivel nanométrico o casi nanométrico, no se empacan tan bien como los polvos no aglomerados. En un polvo no aglomerado después de la compactación, los tamaños de poro disponibles se encuentran entre 20 y 50 por ciento del tamaño del nanocristal. Debido a este pequeño tamaño del poro, la etapa de sinterización y densificación se lleva a cabo rápidamente y a temperaturas más bajas. Por ejemplo, en el caso del TiO_2 no aglomerado (tamaño del polvo menor de 40 nm), se densifica a casi 98 por ciento de la densidad teórica, a 700°C, aproximadamente, con un tiempo de sinterización de 120 min. Por el contrario, para un polvo aglomerado de 80 nm de tamaño promedio constituido por cristalitos de 10 a 20 nm, se densifica a 98 por ciento de la densidad teórica, a unos 900°C, con un tiempo de sinterización de 30 min. La principal causa de la diferencia en la temperatura de sinterización es la presencia de poros más grandes en el compacto aglomerado. En virtud de que se requieren temperaturas de sinterización más altas, los nanocristalitos compactados crecen finalmente hasta un nivel microcristalino, lo que es indeseable. El crecimiento del grano depende en alto grado de la temperatura de sinterización y sólo en forma modesta del tiempo de sinterización. Por tanto, el principal factor para producir con éxito cerámicas nanocristalinas a granel es empezar con polvo nanoaglomerado y optimizar el proceso de sinterización. Sin embargo, esto es muy difícil de lograr.

Para evitar la dificultad de producir cerámicas nanocristalinas a granel, los ingenieros están utilizando la sinterización bajo presión, un proceso de sinterización en el que se aplica presión externa y es similar al *prensado isostático en caliente* (HIP), y la forja sinterizada (véase la sección 11.4). En estos procesos, el compacto de cerámica se deforma y se densifica simultáneamente. La principal ventaja de la forja sinterizada en la producción de cerámica nanocristalina es su mecanismo de contracción del poro. Como se dijo en la sección 11.4.3, en la cerámica microcristalina convencional el proceso de contracción del poro tiene como base la difusión atómica. En la forja sinterizada, la contracción del poro del compacto nanocristalino no es difusional y se basa en la deformación plástica de los cristales. La cerámica nanocristalina es más dúctil (cerca de 50 por ciento de la fusión) que sus homólogos microcristalinos. Se cree que las cerámicas microcristalinas son más dúctiles a causa de la deformación superplástica. Como se dijo en capítulos anteriores, la superplasticidad se presenta por el deslizamiento y la rotación de los granos bajo altas cargas y temperatura. Debido a que pueden deformarse plásticamente, los poros se cierran por compresión del flujo plástico, como se muestra en la figura 11.58, y no por difusión.

Por su capacidad para cerrar poros grandes, incluso los polvos aglomerados pueden densificarse hasta casi sus valores teóricos. Además, la aplicación de presión evita que los granos crezcan más allá de la región de la nanoescala. Por ejemplo, en la forja sinterizada del aglomerado TiO_2 durante 6 horas a una presión de 60 MPa y una temperatura de 610°C, se produce una deformación real de 0.27 (extremadamente alta para cerámicas), una densidad de 91 por ciento del valor teórico y un tamaño de grano promedio de 87 nm. Cuando el mismo polvo es sinterizado sin presión, requiere una temperatura de sinterización de 800°C para alcanzar la misma densidad y se produce un tamaño de grano promedio de 380 nm (no es nanocristalino). Es importante observar que la deformación superplástica en cerámicas nanocristalinas se produce en un intervalo limitado de presiones y temperaturas y es necesario conocer ese intervalo. Si el tratamiento está fuera de dicho intervalo el mecanismo de difusión de la con-

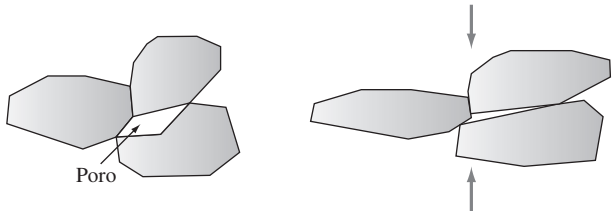


Figura 11.58
Esquema donde se muestra la contracción del poro mediante el flujo plástico (deslizamiento de los límites del grano) en cerámicas nanocristalinas.

tracción del poro puede ocurrir, dando por resultado un producto microcristalino de baja densidad.

En conclusión, los avances en nanotecnología pueden conducir a la producción de cerámicas nanocristalinas con niveles excepcionales de resistencia y ductilidad y, por tanto, a una mejor tenacidad. Específicamente, los adelantos en ductilidad permiten mejorar la unión de las cerámicas a los metales en tecnologías de recubrimiento, y el aumento de la tenacidad permite una mayor resistencia al desgaste. Esas ventajas podrían revolucionar el uso de las cerámicas en una gran variedad de aplicaciones.

11.12 R E S U M E N

Los materiales cerámicos son inorgánicos, no metálicos, constituidos por elementos metálicos y no metálicos unidos sobre todo por enlaces iónicos y/o covalentes. En consecuencia, la composición y la estructura química de los materiales cerámicos varían considerablemente. Pueden estar formados por un solo compuesto, como el óxido de aluminio puro; o por una mezcla compleja de diversas fases, como la mezcla de arcilla, sílice y feldespato que forma la porcelana para uso eléctrico.

Las propiedades de los materiales cerámicos varían también mucho por sus diferencias en los enlaces. En general, casi todos los materiales cerámicos son duros y frágiles, con baja resistencia al impacto y a la ductilidad. Por eso, en la mayoría de los diseños de ingeniería se evitan altos esfuerzos sobre los materiales cerámicos, en especial los esfuerzos de tensión. De ordinario, los materiales cerámicos son buenos aislantes eléctricos y térmicos a causa de la ausencia de electrones de conducción, por lo cual muchas cerámicas se usan como aislantes eléctricos y refractarios. Algunos materiales cerámicos pueden polarizarse en alto grado bajo carga eléctrica y se usan como materiales dieléctricos para capacitores. La polarización permanente de algunos materiales cerámicos les imparte propiedades piezoeléctricas que permiten usarlos como transductores electromecánicos. Otros materiales cerámicos, por ejemplo el Fe_3O_4, son semiconductores y encuentran aplicación en termistores para medir la temperatura. El grafito, el diamante, los *buckyballs* y *buckytubes* son alótropos del carbono y se tratan en este capítulo porque el grafito se considera a veces como material cerámico. Estos alótropos tienen propiedades significativamente diferentes que se relacionan en forma directa con las diferencias en la estructura y el posicionamiento atómico. Los *buckyballs* y *buckytubes* son cada vez más importantes en aplicaciones de nanotecnología.

El procesamiento de materiales cerámicos suele consistir en la aglomeración de pequeñas partículas mediante diversos métodos, en estado seco, plástico o líquido. Los procesos

de moldeado en frío predominan en la industria cerámica, pero los procesos de moldeo en caliente se usan también. El prensado, el moldeo por vaciado de suspensión y la extrusión son procesos de uso común para conformar cerámicos. Después de ser moldeados, los materiales cerámicos son sometidos de ordinario a un tratamiento térmico, como la sinterización o la vitrificación. Durante la sinterización, las pequeñas partículas del producto moldeado se unen por difusión en estado sólido a elevadas temperaturas. En la vitrificación, una fase vítrea sirve como medio de reacción para unir entre sí las partículas no fundidas.

Los vidrios son productos cerámicos inorgánicos de fusión que se enfrían hasta solidificarse por completo sin cristalización. La mayoría de los vidrios inorgánicos tienen como base una red de tetraedros de sílice (SiO_2), enlazada en forma iónica y covalente. La adición de otros óxidos, como Na_2O y CaO, modifica la red de sílice para producir un vidrio más manejable. Otras adiciones dotan al vidrio de todo un espectro de propiedades. Los vidrios tienen propiedades especiales como transparencia, dureza a temperatura ambiente y excelente resistencia a la mayoría de los ambientes, por lo cual son importantes en muchos diseños de ingeniería. Una de las aplicaciones importantes de las cerámicas son los recubrimientos para proteger las superficies de componentes contra la corrosión o el desgaste. Vidrios, óxidos y carburos se usan como materiales de recubrimiento para diversas aplicaciones. Las cerámicas también se aplican en el campo biomédico como materiales para implantes. Su estabilidad química y su biocompatibilidad los hacen perfectamente adecuados para el severo ambiente del cuerpo humano como reemplazos de articulaciones y en otras aplicaciones ortopédicas. La investigación de la nanotecnología es promisoria respecto a atenuar la principal desventaja de los materiales cerámicos: su fragilidad. Investigaciones preliminares muestran que las cerámicas nanocristalinas poseen mayor ductilidad. Esto puede reducir el costo de producción de partes cerámicas más complejas.

11.13 DEFINICIONES

Sección 11.1

Materiales cerámicos: sustancias inorgánicas no metálicas que constan de elementos metálicos y no metálicos, unidos principalmente por enlaces iónicos y/o covalentes.

Sección 11.2

Número de coordinación (NC): número de vecinos equidistantes más próximos de un átomo o ion, en una celda unitaria de una estructura cristalina. Por ejemplo, en NaCl, el NC = 6 porque seis aniones equidistantes de Cl^- rodean a un catión central de Na^+.

Razón de radios (de un sólido iónico): razón entre el radio del catión central y el de los aniones que lo rodean.

Razón de radios crítica (mínima): razón entre el catión central y los aniones circundantes cuando todos éstos apenas se tocan entre sí y al catión central.

Espacio intersticial octaédrico: espacio contenido cuando los núcleos de cuatro átomos (iones) circundantes forman un octaedro.

Espacio intersticial tetraédrico: espacio contenido cuando los núcleos de cuatro átomos (iones) circundantes forman un tetraedro.

Grafito: estructura en capas de átomos de carbono enlazados en forma covalente con otros tres dentro de la misma capa. Las diversas capas están unidas mediante enlaces secundarios.

***Buckyball*:** también llamada Buckminister o bola de fullereno, es una molécula de átomos de carbono (C_{60}) en forma de balón de futbol.

***Buckytube*:** estructura tubular formada por átomos de carbono enlazados en forma covalente entre sí.

Sección 11.4

Prensado en seco: operación simultánea de compactación uniaxial y conformación de partículas granulares de cerámica (y aglutinante) en un molde.

Prensado isostático: compactación y conformación simultáneas de polvos de cerámica (y aglutinante) por medio de presión aplicada uniformemente en todas direcciones.

Moldeo de vaciado de suspensión (lechada): proceso de conformación de cerámica en el cual una suspensión de partículas de cerámica y agua se vacía en un molde poroso y luego una parte del agua que proviene del material moldeado se dispersa en el molde, dejando una figura sólida en el molde. A veces el líquido excedente del sólido moldeado se vacía del molde, dejando un cascarón vaciado.

Sinterización (de un material cerámico): proceso en el cual partículas finas de un material cerámico se enlazan químicamente entre sí a una temperatura suficientemente alta para que ocurra una difusión atómica entre las partículas.

Cocción (de un material cerámico): calentamiento de un material cerámico a una temperatura suficientemente alta para provocar la formación de un enlace químico entre las partículas.

Vitrificación: fundido o moldeo de un vidrio; el proceso de vitrificación se usa para producir vidrio líquido viscoso en una mezcla cerámica sometida a cocción. Al enfriarse, la fase líquida se solidifica y forma una matriz vítrea o vidriosa que enlaza entre sí las partículas no fundidas del material cerámico.

Sección 11.7

Material refractario (cerámica): material que puede soportar la acción de un entorno caliente.

Sección 11.8

Vidrio: material cerámico hecho de materias inorgánicas a altas temperaturas; se distingue de otras cerámicas en que sus componentes se calientan hasta la fusión y luego se enfrían hasta alcanzar una condición de rigidez sin cristalizarse.

Temperatura de transición vítrea: centro del intervalo de temperaturas en el cual un sólido no cristalino deja de ser frágil como vidrio y se vuelve viscoso.

Óxido formador de vidrio: óxido que forma vidrio fácilmente; o bien, óxido que contribuye a la red de vidrio de sílice cuando se agrega a ésta, por ejemplo, el B_2O_3.

Modificadores de red: óxido que rompe la red de sílice cuando se añade al vidrio de sílice; los modificadores reducen la viscosidad del vidrio de sílice y favorecen la cristalización. Algunos ejemplos son: Na_2O, K_2O, CaO y MgO.

Óxidos intermedios: óxidos que pueden actuar ya sea para formar vidrio o como modificadores de éste, dependiendo de la composición del vidrio. Un ejemplo es el Al_2O_3.

Puntos de referencia vítrea (temperaturas).

Punto de trabajo: a esta temperatura el vidrio se puede trabajar con facilidad.

Punto de reblandecimiento: a esa temperatura el vidrio fluye a una tasa considerable.

Punto de recocido: a esta temperatura las tensiones del vidrio pueden relajarse.

Punto de deformación: a esta temperatura el vidrio es rígido.

Vidrio flotado: vidrio plano que se produce haciendo que una tira de vidrio fundido se enfríe hasta el estado vítreo frágil mientras flota sobre un baño plano de estaño fundido en una atmósfera reductora.

Vidrio templado térmicamente: vidrio que se recalienta hasta casi su temperatura de reblandecimiento y luego se enfría rápidamente en aire para introducir esfuerzos de compresión cerca de su superficie.

Vidrio templado químicamente: vidrio que ha recibido un tratamiento químico para introducir iones grandes en su superficie a fin de provocar esfuerzos de compresión en la misma.

Sección 11.9

Vidriado: recubrimiento vítreo aplicado a un sustrato de cerámica.

Esmalte de porcelana: recubrimiento vítreo aplicado a un sustrato metálico.

Esmalte vítreo: recubrimiento vítreo aplicado a un sustrato de vidrio.

Sección 11.10

Protección contra el esfuerzo: condición en la cual el implante aplicado soporta una parte significativa de la carga que corresponde a un hueso fracturado. Tiene efectos colaterales negativos.

11.14 PROBLEMAS

Las respuestas a los problemas marcados con un asterisco se encuentran al final del libro.

11.1 Defina un material cerámico.

11.2 ¿Cuáles son algunas propiedades comunes de la mayoría de los materiales cerámicos?

11.3 Distinga entre materiales cerámicos tradicionales y de ingeniería y cite ejemplos de cada uno.

11.4 Usando la ecuación de Pauling (ecuación 2.10), compare el carácter porcentual covalente de los siguientes compuestos: carburo de hafnio, carburo de titanio, carburo de tantalio, carburo de boro y carburo de silicio.

11.5 ¿Cuáles son los dos principales factores que afectan el empaquetamiento de iones en sólidos iónicos?

11.6 Defina *a*) el número de coordinación y *b*) la razón de radios críticos para el empaquetamiento de iones en sólidos iónicos.

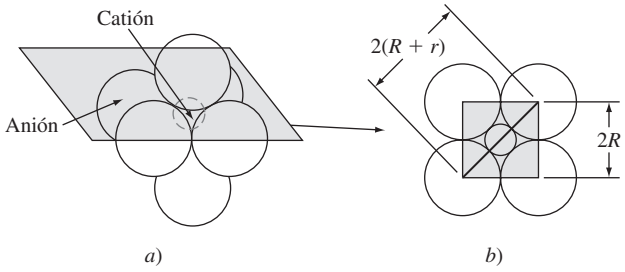
***11.7** Usando la figura 11.59, calcule la relación de radios críticos para la coordinación octaédrica.

11.8 Prediga el número de coordinación para *a*) el BaO y *b*) el LiF. Los radios iónicos son $Ba^{2+} = 0.143$ nm, $O^{2-} = 0.132$ nm, $Li^{+} = 0.078$ nm, $F^{-} = 0.133$ nm.

11.9 Calcule la densidad, en gramos por centímetro cúbico, del CsI, que tiene la estructura del CsCl. Los radios iónicos son $Cs^{+} = 0.165$ nm e $I^{-} = 0.220$ nm.

***11.10** Calcule la densidad, en gramos por centímetro cúbico, del CsBr, que tiene la estructura del CsCl. Los radios iónicos son $Cs^{+} = 0.165$ nm y $Br^{-} = 0.196$ nm.

11.11 Calcule las densidades lineales, en iones por nanómetro, en las direcciones [110] y [111] para *a*) el NiO y *b*) el CdO. Los radios iónicos son $Ni^{2+} = 0.078$ nm, $Cd^{2+} = 0.103$ nm y $O^{2-} = 0.132$ nm.



MatVis

Figura 11.59
a) Coordinación octaédrica de seis aniones (radios = *R*) alrededor de un catión central de radio *r*. *b*) Sección horizontal que pasa por el centro de *a*).

11.12 Calcule las densidades planares, en iones por nanómetro cuadrado, en los planos (111) y (110) para *a*) el CoO y *b*) el LiCl. Los radios iónicos son Co^{2+} = 0.082 nm, O^{2-} = 0.132 nm, Li^{+} = 0.078 nm, y Cl^{-} = 0.181 nm.

***11.13** Calcule la densidad, en gramos por centímetro cúbico, del *a*) SrO y *b*) VO. Los radios iónicos son V^{2+} = 0.065 nm, Co^{2+} = 0.082 nm, y O^{2-} = 0.132 nm.

***11.14** Calcule el factor de empaquetamiento iónico para *a*) el MnO y *b*) el SrO. Los radios iónicos son Mn^{2+} = 0.091 nm, Sr^{2+} = 0.127 nm, y O^{2-} = 0.132 nm.

11.15 El ZnTe tiene la estructura cristalina de la blenda. Calcule la densidad del ZnTe. Los radios iónicos son Zn^{2+} = 0.083 nm y Te^{2-} = 0.211 nm.

***11.16** El BeO tiene la estructura cristalina de la blenda. Calcule la densidad del BeO. Los radios iónicos son Be^{2+} = 0.034 nm y O^{2-} = 0.132 nm.

11.17 Dibuje la celda unitaria para el BaF_2, que tiene la estructura cristalina de la fluorita (CaF_2). Si los iones Ba^{2+} ocupan los espacios reticulares FCC, ¿qué espacios ocupan los iones F^{-}?

***11.18** Calcule la densidad, en gramos por centímetro cúbico, del ZrO_2, que tiene la estructura cristalina del CaF_2. Los radios iónicos son Zr^{4+} = 0.087 nm y O^{2-} = 0.132 nm.

11.19 ¿Qué fracción de los espacios intersticiales octaédricos están ocupados en la estructura del CaF_2?

11.20 Calcule la densidad lineal, en iones por nanómetro, en las direcciones [111] y [110] para el CeO_2, que tiene la estructura de la fluorita. Los radios iónicos son Ce^{4+} = 0.102 nm y O^{2-} = 0.132 nm.

MatVis

***11.21** Calcule la densidad planar, en iones por nanómetro cuadrado, en los planos (111) y (110) del ThO_2, que tiene la estructura de la fluorita. Los radios iónicos son Th^{4+} = 0.110 nm y O^{2-} = 0.132 nm.

11.22 Calcule el factor de empaquetamiento iónico para el SrF_2, que tiene la estructura de la fluorita. Los radios iónicos son Sr^{2+} = 0.125 nm y F^{-} = 0.133 nm.

11.23 ¿Cuál es la estructura de la antifluorita? ¿Qué compuestos iónicos tiene esta estructura? ¿Qué fracción de los espacios intersticiales tetraédricos están ocupados por cationes?

11.24 ¿Por qué sólo dos tercios de los espacios intersticiales octaédricos están llenos de iones Al^{3+} cuando los iones oxígeno ocupan los sitios reticulares HCP en el Al_2O_3?

11.25 Describa la estructura de la perovsquita. ¿Qué fracción de los espacios intersticiales octaédricos están ocupados por el catión tetravalente?

11.26 Calcule el factor de empaquetamiento iónico para el $CaTiO_3$, que tiene la estructura de perovsquita. Los radios iónicos son Ca^{2+} = 0.106 nm, Ti^{4+} = 0.064 nm y O^{2-} = 0.132 nm. Suponga la constante reticular $a = 2(r_{Ti^{4+}} + r_{O^{2-}})$.

***11.27** Calcule la densidad, en gramos por centímetro cúbico, del $SrSnO_3$, que tiene la estructura de perovsquita. Los radios iónicos son Sr^{2+} = 0.127 nm, Sn^{4+} = 0.074 nm y O^{2-} = 0.132 nm. Suponga que $a = 2(r_{Sn^{4+}} + r_{O^{2-}})$.

11.28 ¿Cuál es la estructura cristalina del espinel?

11.29 Dibuje una sección de la estructura del grafito. ¿Por qué las capas de grafito pueden deslizarse fácilmente unas sobre otras?

11.30 Describa e ilustre las siguientes estructuras de silicato: *a*) insular, *b*) cadena y *c*) lámina.

11.31 Describa la estructura de una lámina de caolinita.

11.32 Describa la distribución de enlaces en la estructura reticular de la cristobalita (sílice).

11.33 Describa la estructura reticular del feldespato.

11.34 ¿Cuáles son los tres pasos básicos en el procesamiento de productos cerámicos mediante la aglomeración de partículas?

11.35 ¿Qué tipos de ingredientes se añaden a las partículas de cerámica al preparar la materia prima de cerámicas para su procesamiento?

11.36 Describa dos métodos de preparación de la materia prima de cerámicas para su procesamiento.

11.37 Describa el método de prensado en seco para producir productos cerámicos como los compuestos cerámicos técnicos y los refractarios estructurales. ¿Cuáles son las ventajas de los materiales cerámicos prensados en seco?

11.38 Describa el método de prensado isostático para producir productos cerámicos.

11.39 Describa los cuatro pasos de la fabricación del aislador de una bujía de encendido.

11.40 ¿Cuáles son las ventajas de los materiales cerámicos prensados en caliente?

11.41 Describa los pasos en el proceso de moldeo por vaciado de suspensión para productos cerámicos.

11.42 ¿Cuál es la diferencia entre *a*) el moldeo por drenado y *b*) el moldeo por vaciado de suspensión sólido?

11.43 ¿Cuáles son las ventajas del moldeo por vaciado de suspensión?

11.44 ¿Qué tipos de productos cerámicos se producen por extrusión? ¿Cuáles son las ventajas de este proceso? ¿Y sus limitaciones?

11.45 ¿Cuáles son los propósitos de secar los productos cerámicos antes de su cocción?

11.46 ¿Qué es el proceso de sinterización? ¿Qué les sucede a las partículas de cerámica durante la sinterización?

11.47 ¿Qué es el proceso de vitrificación? ¿En qué tipo de materiales cerámicos ocurre la vitrificación?

11.48 ¿Cuáles son los tres componentes básicos de las cerámicas tradicionales?

11.49 ¿Cuál es la composición aproximada de la arcilla caolín?

11.50 ¿Qué papel desempeña la arcilla en las cerámicas tradicionales?

11.51 ¿Qué es el sílex? ¿Qué función desempeña en las cerámicas tradicionales?

11.52 ¿Qué es el feldespato? ¿Qué función desempeña en las cerámicas tradicionales?

11.53 Haga una lista con ejemplos de productos cerámicos de whiteware.

11.54 ¿Por qué se usa el término *triaxial* para describir algunos whitewares?

11.55 Determine la composición del compuesto ternario en el punto *y* de la figura 11.34.

11.56 ¿Por qué las porcelanas triaxiales no pueden usarse con altas frecuencias?

11.57 ¿Qué tipo de iones provocan un incremento en la conductividad de la porcelana eléctrica?

11.58 ¿Cuál es la composición de la mayoría de las cerámicas técnicas?

11.59 ¿Cómo se procesan las partículas de cerámica técnicas de un solo compuesto puro para elaborar un producto sólido? Cite un ejemplo.

11.60 ¿Cuál es la causa de la falta de plasticidad de las cerámicas cristalinas?

11.61 Explique el mecanismo de deformación plástica de algunos sólidos iónicos de un monocristal, como el NaCl y el MgO. ¿Cuál es el sistema de deslizamiento preferido?

11.62 ¿Qué defectos estructurales son la causa principal de fallas en los materiales cerámicos policristalinos?

11.63 ¿Cómo influyen *a*) la porosidad y *b*) el tamaño del grano en la resistencia a la tensión de los materiales cerámicos?

11.64 Una cerámica de nitruro de silicio unida por reacción tiene una resistencia de 250 MPa y una tenacidad a la fractura de 3.4 MPa $-\sqrt{\text{m}}$. ¿Cuál es el defecto interno de mayor tamaño que este material puede soportar sin fracturarse? (Use $Y = 1$ en la ecuación de tenacidad a la fractura.)

11.65 El defecto interno de máximo tamaño en una cerámica de carburo de silicio prensado en caliente es 25 μm. Si este material tiene una tenacidad a la fractura de 3.7 MPa $-\sqrt{\text{m}}$, ¿cuál es el máximo esfuerzo que este material puede soportar? (Use $Y = \sqrt{\pi}$.)

11.66 Una cerámica avanzada de circonia parcialmente estabilizada tiene una resistencia de 352 MPa y una tenacidad a la fractura de 7.5 MPa $-\sqrt{\text{m}}$. ¿Cuál es el defecto interno de mayor tamaño (expresado en micrómetros) que este material puede soportar? (Use $Y = \sqrt{\pi}$.)

11.67 Una muestra policristalina cúbica y totalmente estabilizada de ZrO_2 tiene una tenacidad a la fractura de $K_{IC} = 3.8$ MPa $-\sqrt{\text{m}}$ cuando es sometida a una prueba de flexión de cuatro puntos.

a) Si la muestra falla bajo un esfuerzo de 450 MPa, ¿cuál es el tamaño del mayor defecto superficial? Suponga $Y = \sqrt{\pi}$.

b) La misma prueba se lleva a cabo con una muestra de ZrO_2 parcialmente estabilizada. Este material es endurecido por transformación y tiene un $K_{IC} = 12.5$ MPa $-\sqrt{\text{m}}$. Si este material tiene la misma distribución de defectos que la muestra totalmente estabilizada, ¿qué esfuerzo se debe aplicar para provocar una fractura?

11.68 ¿Cuáles son los dos abrasivos industriales más importantes?

11.69 ¿Cuáles son las propiedades importantes de los abrasivos industriales?

11.70 ¿Por qué los materiales cerámicos, la mayoría, tienen baja conductividad térmica?

11.71 ¿Qué son los refractarios? ¿Cuáles son algunas de sus aplicaciones?

11.72 ¿Cuáles son los dos principales tipos de materiales refractarios cerámicos?

11.73 Describa la composición y varias aplicaciones de los siguientes refractarios: *a*) sílice, *b*) barro refractario y *c*) alta alúmina.

11.74 ¿Cuál es la constitución de la mayoría de los refractarios básicos? ¿Cuáles son algunas propiedades importantes de los refractarios básicos? ¿Cuál es la principal aplicación de estos materiales?

11.75 ¿De qué está hecho el aislamiento superficial reutilizable contra altas temperaturas que puede soportar temperaturas hasta de 1 260°C?

11.76 Defina un vidrio.

11.77 ¿Cuáles son algunas propiedades de los vidrios que los hacen indispensables en muchos diseños de ingeniería?

11.78 ¿Cómo se distingue un vidrio de otros materiales cerámicos?

11.79 ¿Qué diferencia hay entre la gráfica de volumen específico contra temperatura de un vidrio y la de un material cristalino cuando estos materiales son enfriados a partir del estado líquido?

11.80 Defina la temperatura de transición vítrea.

11.81 Mencione el nombre de dos óxidos que forman vidrio. ¿Cuáles son sus subunidades fundamentales y su forma?

11.82 ¿Cuál es la diferencia entre la red de sílice de un vidrio de sílice simple y la de la sílice cristalina (cristobalita)?

11.83 ¿Cómo es posible que los triángulos de BO_3^{3-} se conviertan en tetraedros BO_4^{4-} y sigan manteniendo su neutralidad en algunos vidrios de borosilicato?

11.84 ¿Qué son los modificadores de la red de vidrio? ¿Cómo afectan la red de vidrio-sílice? ¿Por qué se agregan al vidrio de sílice?

11.85 ¿Qué son los óxidos intermedios del vidrio? ¿Cómo afectan la red de sílice-vidrio? ¿Por qué se agregan al vidrio de sílice?

11.86 ¿Qué es el vidrio de sílice fundido? ¿Cuáles son algunas de sus ventajas y desventajas?

11.87 ¿Cuál es la composición básica del vidrio de soda-cal? ¿Cuáles son algunas de sus ventajas y desventajas? ¿Cuáles son algunas aplicaciones para el vidrio de soda-cal?

11.88 ¿Con qué propósito se agrega *a*) MgO y *b*) Al_2O_3 al vidrio de sosa-cal?

11.89 Defina los siguientes puntos de referencia de viscosidad para vidrios: funcionamiento, ablandamiento, recocido y deformación.

11.90 ¿Cuál es la diferencia entre vidrios duros y blandos, y entre vidrios largos y cortos?

11.91 Entre 500°C (punto de deformación) y 700°C (punto de reblandecimiento), una placa de vidrio de soda-cal presenta viscosidades de $10^{14.2}$ y $10^{7.5}$ P, respectivamente. Calcule un valor para la energía de activación en esta región de temperaturas.

11.92 Un vidrio de soda-cal tiene una viscosidad de $10^{14.6}$ P a 560°C. ¿Cuál será su viscosidad a 675°C si la energía de activación del flujo viscoso es de 430 kJ/mol?

***11.93** Un vidrio de soda-cal tiene una viscosidad de $10^{14.3}$ P a 570°C. ¿A qué temperatura la viscosidad será $10^{9.9}$ P si la energía de activación del proceso es de 430 kJ/mol?

11.94 Entre 600°C (punto de recocimiento) y 800°C (punto de ablandamiento), un vidrio de borosilicato tiene viscosidades de $10^{12.5}$ P y $10^{7.4}$ P, respectivamente. Calcule un valor para la energía de activación del flujo viscoso en esta región, suponiendo que la ecuación $\eta = \eta_0 e^{Q/RT}$ es válida.

11.95 Describa el proceso de vidrio flotado para la producción de productos de vidrio plano. ¿Cuál es su mayor ventaja?

11.96 ¿Qué es el vidrio templado? ¿Cómo se produce? ¿Por qué el vidrio templado es considerablemente más resistente a la tensión que el vidrio recocido? ¿Cuáles son algunas aplicaciones del vidrio templado?

11.97 ¿Qué es el vidrio reforzado químicamente? ¿Por qué el vidrio reforzado químicamente es más resistente a la tensión que el vidrio recocido?

11.15 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. *a*) Comente las ventajas y desventajas de usar cerámicas avanzadas en la estructura de motores de combustión interna. *b*) Proponga algunos métodos para reducir las deficiencias en esta aplicación de materiales cerámicos.

2. Investigue las aplicaciones de los cerámicos en la industria electrónica. *a*) ¿Cuáles son esas aplicaciones? *b*) ¿Por qué se seleccionan materiales cerámicos?

3. Algunas partes de cerámica se fabrican con un método llamado procesamiento Sol-Gel. *a*) Explique el significado de Sol. *b*) Explique el significado de Gel. *c*) Explique cómo funciona este proceso. *d*) ¿Cuál es la ventaja de dicho proceso sobre las técnicas convencionales de metalurgia de polvos?

4. Con propósitos de aislamiento, se desea cubrir la superficie de un sustrato con una capa extremadamente delgada de Si_3N_4. *a*) Proponga un proceso con el que se pueda lograr esto. *b*) ¿El proceso propuesto se puede usar para moldear objetos grandes con formas complejas? Explique.

5. *a*) ¿Qué elementos se usan en la estructura del carborundo de cerámica? *b*) ¿Cómo se fabrica a granel esta cerámica? *c*) ¿Cuáles son algunas de sus propiedades importantes?

6. *a*) ¿Qué son los sialones? *b*) ¿Cómo se fabrican? *c*) ¿Cuáles son sus aplicaciones?

7. Explique, desde el punto de vista de estructura atómica, por qué los metales se pueden deformar plásticamente para darles formas grandes y complejas, mientras que las partes complejas de cerámica no pueden fabricarse en esta forma.

8. La alúmina (Al_2O_3) y el óxido de cromo (Cr_2O_3) son materiales cerámicos que forman un diagrama de fases isomorfo. *a*) ¿Qué deduce usted de esto acerca del límite de solubilidad de un componente en el otro? *b*) ¿Qué tipo de solución sólida se forma? *c*) Explique qué sustitución se lleva a cabo.

9. *a*) ¿Cómo se unen a la estructura del transbordador espacial las losetas de cerámica que se usan en el sistema de protección térmica? *b*) ¿Por qué el sistema de protección térmica del transbordador espacial está hecho de losetas pequeñas (de 15 a 20 cm de ancho) y no de losetas más grandes y contorneadas?

10. El cono de la ojiva y los bordes delanteros del ala del transbordador espacial pueden alcanzar temperaturas de hasta 1 650°C. *a*) ¿El compuesto de fibra de sílice (HRSI) es un candidato adecuado para estas secciones del transbordador? *b*) Si no es así, seleccione un material adecuado para este fin. *c*) ¿Cuáles son las propiedades importantes del material seleccionado que satisfacen las necesidades de diseño?

11. Los compuestos carbono/carbono tienen propiedades deseables a muy altas temperaturas que los hacen adecuados para muchas aplicaciones aeroespaciales. Sin embargo, el carbono del material puede reaccionar con el oxígeno de la atmósfera a temperaturas superiores a 450°C, formando óxidos gaseosos. *a*) Encuentre soluciones para este problema. *b*) Diseñe un proceso adecuado para su solución.

12. La baja tenacidad es el principal problema con numerosas cerámicas estructurales. Muchas herramientas de corte están hechas de cerámica cuyas propiedades de dureza han sido mejoradas. Por ejemplo, tienen partículas de carburo de tungsteno (WC) incrustadas en una matriz metálica como níquel o cobalto. *a*) Explique cómo mejora esto la dureza de la herramienta. *b*) ¿Por qué es importante la elección del material matriz? ¿Funcionaría el aluminio como material matriz?

13. Es muy difícil dar la forma deseada a los componentes cerámicos. Esto se debe a que las cerámicas son fuertes y frágiles. Los esfuerzos producidos por las fuerzas cortantes pueden producir grietas en la superficie y otros daños que, a su vez, debilitarán el componente. Proponga una técnica para reducir las fuerzas cortantes y la posibilidad de agrietamiento durante la fabricación de cerámicas.

14. El concreto es un material de construcción importante y se clasifica como un material cerámico (o un cerámico compuesto). Tiene excelentes características de resistencia a la compresión, pero es extremadamente débil a la tensión. *a*) Proponga formas de mejorar las características del concreto para soportar la tensión. *b*) ¿Qué problemas prevé en su proceso?

15. Las llaves convencionales son propensas a gotear porque las juntas de caucho son susceptibles al desgaste y la base de metal (de bronce) es susceptible a la corrosión. *a*) ¿Qué tipo de materiales serían un reemplazo adecuado para la combinación caucho/metal, de modo que se redujera el problema de goteo? *b*) Seleccione un material especial para este problema. *c*) ¿Qué problemas anticiparía en el uso o fabricación de esos componentes?

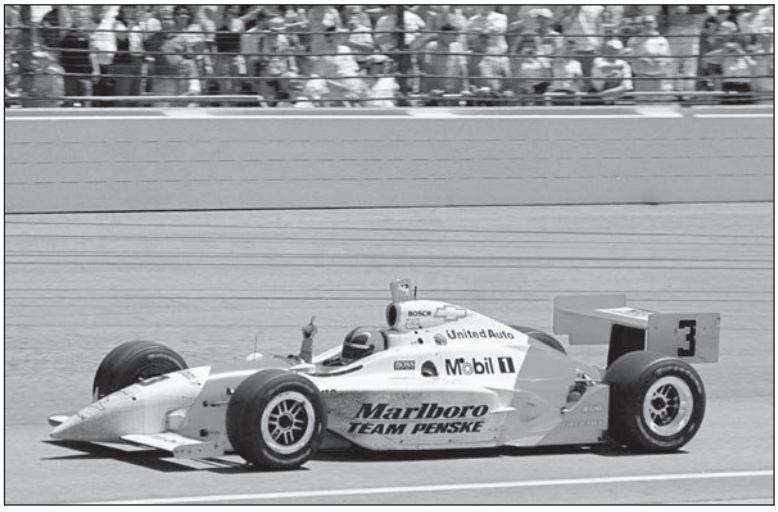
16. Un problema importante en la selección de materiales cerámicos para diversas aplicaciones es la resistencia al choque térmico. *a*) ¿Qué es un choque térmico? *b*) ¿Qué factores controlan la resistencia de un material al choque térmico? *c*) ¿Qué cerámicos específicos tienen la mejor resistencia al choque térmico?

17. Considere la unión de un chip de silicio con un marco de plomo metálico en dispositivos electrónicos. Estas uniones de cerámica y metal no funcionan muy bien cuando la temperatura aumenta. *a*) ¿Puede explicar por qué? *b*) ¿Puede proponer una solución?

18. *a*) Al seleccionar el material para el parabrisas de un automóvil, ¿qué tipo de vidrio usaría? *b*) Proponga un proceso para hacer inastillable el material que seleccionó.

CAPÍTULO 12

Materiales compuestos



(© AFP/CORBIS)

Los compuestos de carbono-carbono tienen una combinación de propiedades que los hacen únicos por su desempeño superior a temperaturas tan altas como 2 800°C. Por ejemplo, los compuestos de carbono-carbono (55% en volumen de fibra) con tratamiento superficial y módulo alto unidireccional, tienen un módulo de tensión de 180 GPa a temperatura ambiente, que llega a ser de 175 GPa a 2 000°C. La resistencia a la tensión también es notablemente constante, pues varía de 950 MPa a temperatura ambiente a 1 100 MPa a 2 000°C. Además, propiedades tales como la alta conductividad térmica y el bajo coeficiente de expansión térmica, aunadas a alta resistencia y módulo, indican que el material es resistente al choque térmico. La combinación de esas propiedades hace que el material sea adecuado para aplicaciones de reingreso a la atmósfera, motores de cohetes espaciales y frenos aeronáuticos. La aplicación más comercial de este material son los forros de las zapatas de frenos de autos de carreras.[1] ■

[1] *ASM Engineered Materials Handbook, Composites*, volumen 1, ASM International, 1991.

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

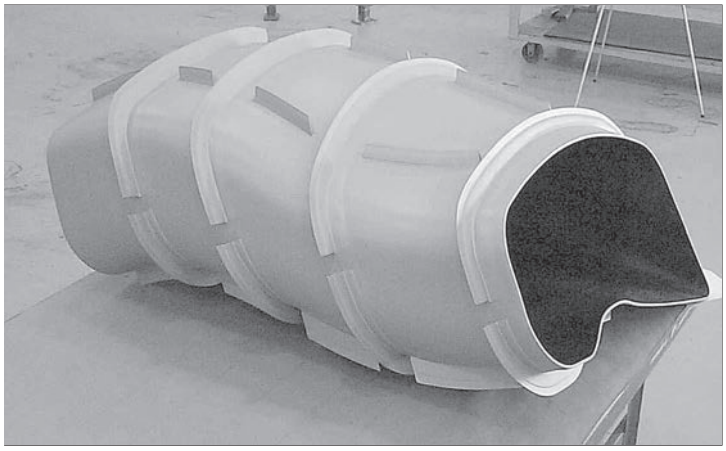
Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Definir un material compuesto, sus principales constituyentes y sus diversas clasificaciones.
2. Describir la función de las partículas de refuerzo (fibra) y de la matriz (resina). Nombrar distintas variedades de cada uno.
3. Definir un compuesto laminado multidireccional y sus ventajas sobre los compuestos laminados unidireccionales.
4. Describir cómo se podrían estimar las propiedades de un material compuesto reforzado con fibras, a partir de las propiedades del material y de la fracción de volumen de los componentes de la matriz y la fibra.
5. Describir varios procesos que se usan para producir un componente con materiales compuestos.
6. Describir las propiedades, características y clasificaciones del concreto, el asfalto y la madera, materiales compuestos que se usan ampliamente en aplicaciones estructurales y de construcción.
7. Definir una estructura de multicapas.
8. Definir los compuestos CMP, CMM y CMC, señalando las ventajas y desventajas de cada uno.
9. Describir la estructura de un hueso, sus componentes, sus propiedades mecánicas y su comportamiento viscoelástico.

12.1 INTRODUCCIÓN

¿Qué es un material compuesto? Desafortunadamente no existe una definición ampliamente aceptada de lo que es un material compuesto. Un diccionario define un compuesto como algo hecho de diferentes partes (componentes o constituyentes). En el nivel atómico ciertos materiales, como algunas aleaciones metálicas y materiales poliméricos, pueden considerarse como materiales compuestos porque se componen de agrupamientos atómicos diferentes y distintivos. En el nivel microestructural (de 10^{-4} a 10^{-2} cm, aproximadamente) una aleación de metal, como un acero al carbono simple que contiene ferrita y perlita, podría considerarse como un material compuesto porque la ferrita y la perlita son componentes visibles y distintivos cuando se observan en el microscopio óptico. En el nivel macroestructural (10^{-2} cm, aproximadamente, o más) un plástico reforzado con fibra de vidrio, en el que la fibra de vidrio se puede reconocer claramente a simple vista, podría considerarse como un material compuesto. Ahora se ve que la dificultad que implica definir un material compuesto consiste en las limitaciones de tamaño que se imponen a los componentes que forman parte del material. En diseño de ingeniería, un material compuesto suele consistir en un material formado por constituyentes en un rango de escalas que va de micro a macro, e incluso favorece el nivel macro. Para los propósitos de este libro, la siguiente es una definición de un material compuesto:

> Un **material compuesto** es un sistema de materiales formado por una mezcla o combinación debidamente dispuesta de dos o más micro o macroconstituyentes con una intracara que los separa, que difieren en forma y composición química y son esencialmente insolubles entre sí.



a)

b)

Figura 12.1
a) Artículo ducto terminado con bridas curadas para hacer una prueba.
(Según la p. 37, paso 7 de High-Performance Composites Magazine, enero de 2002.)
b) La ubicación de una fibra de carbono llegó a tener un papel clave en el avión de combate para ataques conjuntos del X-35 de la Lockheed-Martin's. Un ducto de admisión con fibra de carbono se fabrica cuatro veces más rápido que su equivalente convencional y se requiere un número mucho menor de sujetadores.
(Tomado de la portada de High-Performance Composites Magazine, enero de 2002.)

La importancia que tiene para la ingeniería un material compuesto es que dos o más materiales diferentes se combinan para formar otro cuyas propiedades son superiores a las de sus componentes individuales o tienen importancia en algún otro aspecto. Multitud de materiales corresponden a esta categoría, por lo cual el análisis de todos los materiales compuestos rebasa ampliamente el alcance de este libro. En este capítulo sólo serán analizados algunos de los materiales compuestos más importantes que se usan en ingeniería. Se trata de plásticos reforzados con fibra, concreto, asfalto, madera y varios tipos de materiales compuestos. Algunos ejemplos del uso de materiales compuestos en proyectos de ingeniería se muestran en la figura 12.1.

12.2 FIBRAS PARA MATERIALES COMPUESTOS DE PLÁSTICO REFORZADO

En Estados Unidos se usan tres tipos principales de fibras sintéticas para reforzar materiales plásticos: vidrio, aramida[2] y carbono. El vidrio es, por amplio margen, la fibra de refuerzo que se usa más y a menudo la de menor costo. Las fibras de aramida y de carbono tienen alta resistencia y baja densidad, por lo cual se usan en muchas aplicaciones, sobre todo aeroespaciales, a pesar de tener un costo más alto.

12.2.1 Fibras de vidrio para reforzar resinas de plástico

Las fibras de vidrio se usan como refuerzo de matrices de plástico para formar compuestos estructurales y compuestos de moldeo. Los materiales compuestos de plástico con fibra de vidrio tienen las siguientes características favorables: alta relación entre resistencia y peso; buena estabilidad dimensional; buena resistencia al calor, el frío, la humedad y a la corrosión; buenas propiedades de aislamiento eléctrico; facilidad de fabricación y costo relativamente bajo.

Los dos tipos más importantes de vidrio que se utilizan en la producción de fibra de vidrio para compuestos son los *vidrios E* (*eléctricos*) y *S* (*alta resistencia*).

El **vidrio E** es el que se usa más comúnmente en fibras continuas. En esencia, el vidrio E está hecho de cal, aluminio y borosilicato con niveles de sodio y potasio nulos o bajos. La composición básica del vidrio E fluctúa entre 52 y 56% SiO_2, 12 a 16% Al_2O_3, 16 a 25% CaO y de 8 a 13% B_2O_3. El vidrio E tiene una resistencia a la tensión de 500 ksi (3.44 GPa), aproximadamente, en estado virgen y un módulo de elasticidad de 10.5 Msi (72.3 GPa).

El **vidrio S** tiene una relación entre resistencia y peso más alta y es más caro que el vidrio E; se usa sobre todo en aplicaciones militares y aeroespaciales. La resistencia a la tensión del vidrio S es superior a 650 ksi (4.48 GPa) y su módulo de elasticidad es de 12.4 Msi (85.4 GPa), aproximadamente. Una composición típica del vidrio S es de cerca de 65% SiO_2, 25% Al_2O_3 y 10% MgO.

Producción de fibras de vidrio y tipos de materiales reforzados con fibra de vidrio Las fibras de vidrio se producen extrayendo monofilamentos de vidrio de un horno que contiene vidrio fundido y reuniendo un gran número de esos filamentos se tuercen para formar un hilo de fibras de vidrio (figura 12.2). Los hilos se usan entonces para formar madejas de fibra de vidrio (figura 12.3*a*) llamadas "*rovings*", las cua-

[2] La fibra de aramida es una fibra de polímero de poliamida aromática con estructura molecular muy rígida.

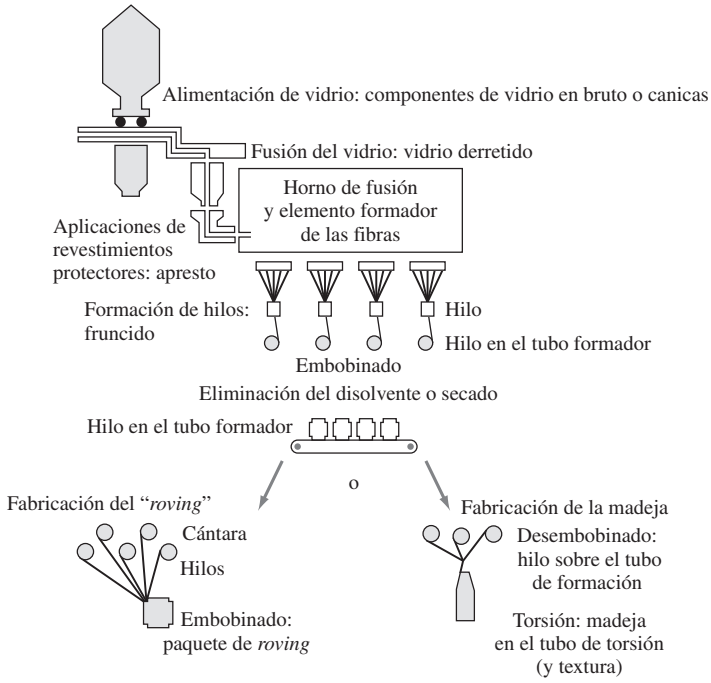


Figura 12.2
Proceso de fabricación de la fibra de vidrio.
(Según M. M. Schwartz, "Composite Materials Handbook", McGraw-Hill, 1984, pp. 2-24.)

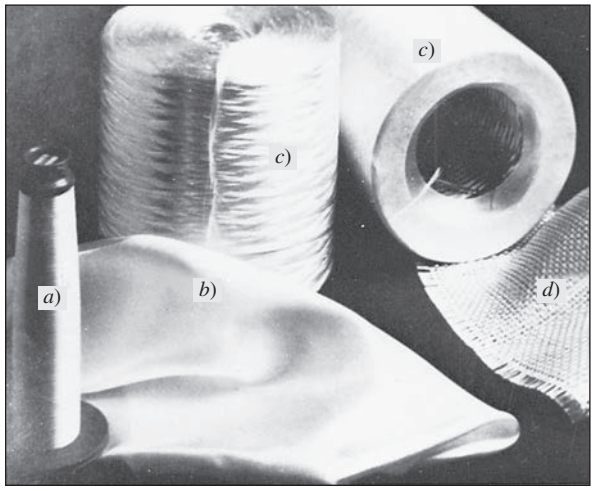


Figura 12.3
Refuerzos de fibra de vidrio para plásticos: *a*) hilo de fibra de vidrio, *b*) tela tejida de hilo de fibra de vidrio, *c*) *roving* de hebra continua y *d*) *roving* tejido.
(Cortesía de Owens/Corning Fiberglas Co.)

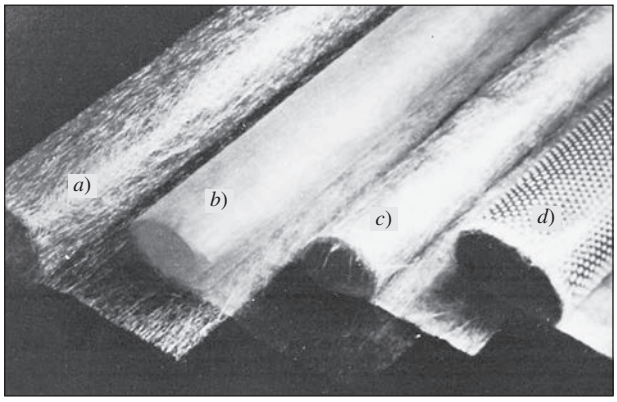


Figura 12.4
Colchonetas con refuerzo de fibra de vidrio: *a*) colchoneta de hilo continuo, *b*) colchoneta de revestimiento, *c*) colchoneta hecha con hilo cortado y *d*) combinación de *roving* tejido y colchoneta de hilo cortado.
(Cortesía de Owens/Corning Fiberglas Co.)

Tabla 12.1 Propiedades comparativas de los hilos utilizados como fibras de refuerzo para plásticos

Propiedad	Vidrio (E)	Carbono (HT)	Aramida (Kevlar 49)
Resistencia a la tensión, ksi (MPa)	450 (3 100)	500 (3450)	525 (3 600)
Módulo de tensión, Msi (GPa)	11.0 (76)	33 (228)	19 (131)
Elongación en el punto de ruptura (%)	4.5	1.6	2.8
Densidad (g/cm^3)	2.54	1.8	1.44

les están formadas por haces de filamentos continuos (figura 12.3*c*). Los "*rovings*" pueden presentarse como hilos continuos o también como hilos entretejidos, para fabricar los "*rovings*" tejidos (figura 12.3*d*). Las colchonetas reforzadas con fibra de vidrio (figura 12.4) se fabrican con hilos continuos (figura 12.4*a*) o con trozos de hilos (figura 12.4*c*). De ordinario, los hilos se mantienen unidos mediante un aglutinante a base de resina. Las colchonetas de combinación se fabrican con "*rovings*" tejidos que están unidos químicamente a la colchoneta hecha con hilo cortado (figura 12.4*d*).

Propiedades de las fibras de vidrio En la tabla 12.1 las propiedades de tensión y densidad de las fibras de vidrio E se comparan con las de las fibras de carbono y aramida. Se observa que las fibras de vidrio tienen valores más bajos de resistencia a la tensión y módulo elástico que las fibras de carbono y aramida, pero su elongación es mayor. La densidad de las fibras de vidrio también es más alta que la de las fibras de carbono y aramida. Sin embargo, debido a su bajo costo y versatilidad, las fibras de vidrio son por amplio margen las fibras que se usan más comúnmente como refuerzo para plásticos (tabla 12.1).

12.2.2 Fibras de carbono para plásticos reforzados

Los materiales compuestos que se fabrican utilizando fibras de carbono para reforzar matrices de resina plástica, como las epóxicas, se caracterizan por tener una combinación de ligereza de peso, muy alta resistencia y elevada rigidez (módulo de elastici-

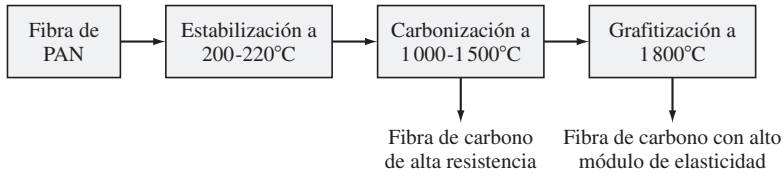


Figura 12.5
Pasos del proceso para producir fibras de carbono de alta resistencia y alto módulo de elasticidad a partir de material precursor de poliacrilonitrilo.

dad). Estas propiedades hacen que el uso de materiales compuestos de plástico con fibras de carbono sea especialmente atractivo para aplicaciones aeroespaciales, como la parte de aeronave que se muestra en la figura 12.1. Desafortunadamente, el costo relativamente alto de las fibras de carbono limita su uso en muchas industrias, como la automotriz. Las **fibras de carbono** para esos compuestos provienen principalmente de dos fuentes: el *poliacrilonitrilo* (PAN) (véase la sección 10.8) y la brea, que reciben el nombre de *precursores.*

En general, las fibras de carbono se producen a partir de las fibras precursoras de PAN en un proceso de tres etapas: 1) estabilización, 2) carbonización y 3) grafitización (figura 12.5). En la *etapa de estabilización*, las fibras de PAN se estiran primero para alinear las redes fibrilares dentro de cada fibra en dirección paralela al eje de la misma, después se oxidan en aire a una temperatura entre 200 y 220°C (392 a 428°F) manteniéndolas siempre en tensión.

La segunda etapa en la producción de fibras de carbono de alta resistencia es la *carbonización.* En este proceso, las fibras a base de PAN estabilizadas son pirolizadas (calentadas) hasta que se transforman en fibras de carbón por la eliminación de O, H y N de la fibra precursora. El tratamiento térmico de carbonización suele realizarse en una atmósfera inerte dentro del rango de 1 000 a 1 500°C (1 832 a 2 732°F). En el proceso de carbonización se forman fibrillas o cintas dentro de cada fibra, que aumentan considerablemente la resistencia del material a la tensión.

Una tercera etapa, el *tratamiento de grafitización*, se agrega cuando se desea lograr un incremento del módulo de elasticidad a expensas de la alta resistencia a la tensión. Durante la grafitización, que se lleva a cabo por arriba de los 1 800°C (3 272°F), se incrementa la orientación deseada de las cristalitas con apariencia de grafito dentro de cada fibra.

Las fibras de carbono producidas por el material precursor PAN tienen una resistencia a la tensión que fluctúa entre 450 y 650 ksi (3.10 y 4.45 GPa), aproximadamente, y un módulo de elasticidad que oscila entre 28 y 35 Msi (193 a 241 GPa). En general, las fibras con más alto módulo de elasticidad tienen menos resistencia a la tensión y viceversa. La densidad de las fibras de PAN carbonizadas y grafitizadas suele ser de entre 1.7 y 2.1 g/cm^3, mientras que su diámetro final es de 7 a 10 μm, aproximadamente. En la figura 12.6 se muestra la fotografía de un grupo de unas 6 000 fibras de carbono que reciben el nombre de **atado**.

12.2.3 Fibras de aramida para reforzar resinas de plástico

Fibra de aramida es el nombre genérico de las fibras de poliamida aromática. Las fibras de aramida fueron presentadas comercialmente en 1972 por Du Pont con el nombre comercial de Kevlar, y en la actualidad se ofrecen en dos tipos comerciales: kevlar

Figura 12.6
Fotografía de un atado formado por unas 6 000 fibras de carbono.
(Cortesía de la Fiberite Co., Winona, Minn.)

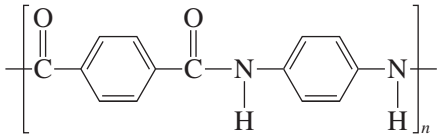


Figura 12.7
Unidad estructural química repetitiva de las fibras kevlar.

29 y 49. El Kevlar 29 es una fibra aramida de baja densidad y alta resistencia, diseñada para ciertas aplicaciones, como protección balística, cuerdas y cables. El Kevlar 49 se caracteriza por su baja densidad y alta resistencia y módulo de elasticidad. Las propiedades del Kevlar 49 hacen que sus fibras sean útiles como refuerzos de plástico en materiales compuestos para aplicaciones aeroespaciales, marítimas, automotrices y otras de tipo industrial.

La unidad química que se repite en la cadena del polímero kevlar es la de una poliamida aromática, como se muestra en la figura 12.7. El enlace de hidrógeno mantiene juntas las cadenas del polímero en dirección transversal. De esta manera, en forma colectiva, estas fibras tienen alta resistencia longitudinal y una resistencia débil en dirección transversal. La estructura del anillo aromático imparte alta rigidez a las cadenas de polímero, haciendo que se comporten como una estructura en forma de varilla.

La aramida kevlar se usa en aplicaciones a base de materiales compuestos de alto rendimiento cuando el peso liviano, la elevada resistencia y la rigidez, la resistencia a daños, la resistencia a la fatiga y a la ruptura por tensión son importantes. Un hecho de especial interés es que el material kevlar-epoxi se ha usado en varias partes de los transbordadores espaciales.

12.2.4 Comparación de las propiedades mecánicas de las fibras de carbono, aramida y vidrio para materiales compuestos de plástico reforzado

En la figura 12.8 se comparan los diagramas típicos de esfuerzo y deformación para fibras de carbono, aramida y vidrio, y se puede observar que la resistencia de la fibra

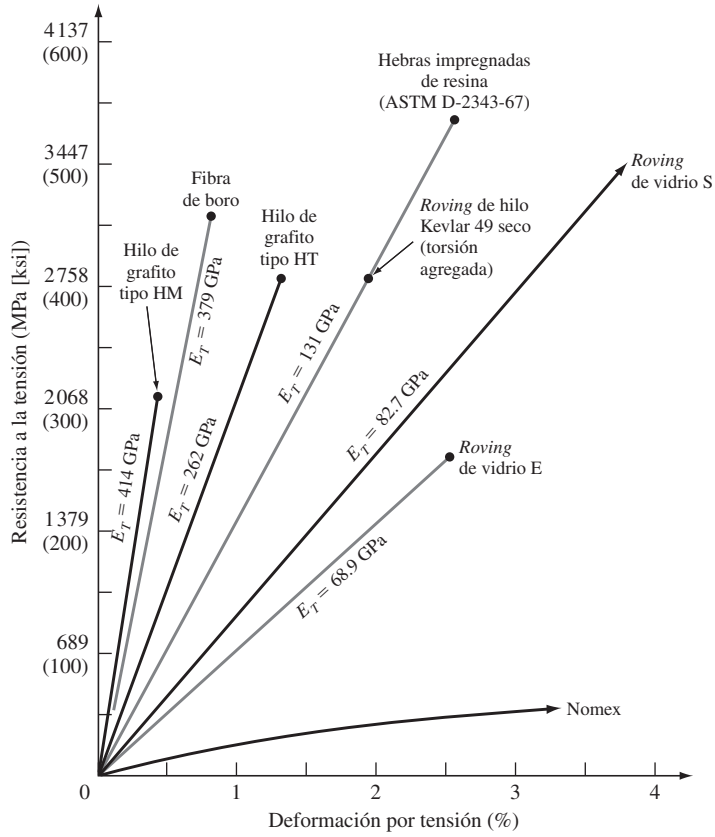


Figura 12.8
Comportamiento de esfuerzo-deformación de varios tipos de fibras de refuerzo.
(Según "Kevlar 49 Data Manual", E. I. Du Pont de Nemours & Co., 1974.)

varía entre 250 y 500 ksi (1 720 y 3 440 MPa), mientras la deformación al momento de la fractura fluctúa entre 0.4 y 4.0 por ciento. El módulo de elasticidad bajo tensión de estas fibras oscila entre 10×10^6 a 60×10^6 psi (68.9 a 413 GPa). Las fibras de carbono ofrecen la mejor combinación de alta resistencia, elevada rigidez (módulo de elasticidad alto) y baja densidad, pero tienen menores elongaciones. La fibra de aramida Kevlar 49 posee una combinación de alta resistencia, módulo de elasticidad elevado (aunque no tanto como las fibras de carbono), baja densidad y alta elongación (y resistencia al impacto). Las fibras de vidrio tienen menores resistencias y módulos de elasticidad, y más altas densidades (tabla 12.1). Entre las fibras de vidrio, las de tipo S tienen más altas resistencias y elongaciones que las de tipo E. En virtud de que las fibras de vidrio son mucho menos caras, se utilizan más ampliamente.

En la figura 12.9 se comparan la resistencia con la densidad, y la rigidez (módulo de tensión) con la densidad, de varias fibras de refuerzo. Esta comparación muestra los notables índices de resistencia y rigidez respecto al peso de las fibras de carbono y aramida (Kevlar 49), en comparación con las mismas propiedades en el caso del acero y

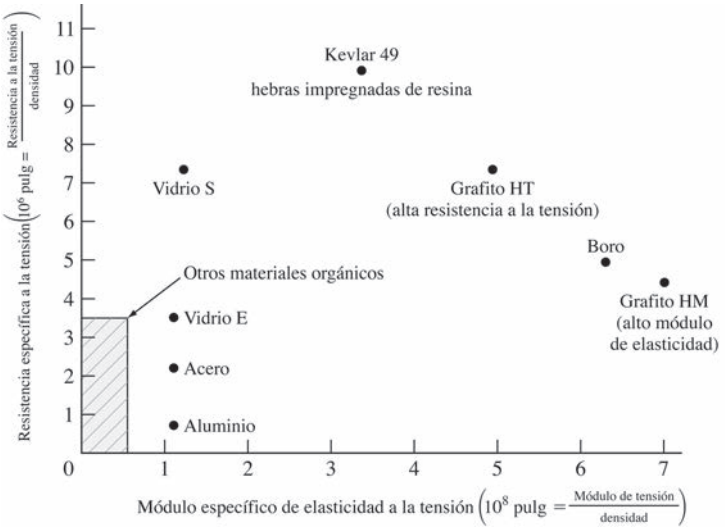


Figura 12.9
Resistencia específica a la tensión (resistencia a la tensión respecto a la densidad) y **módulo específico a la tensión** (módulo a la tensión respecto a la densidad) para varios tipos de fibras de refuerzo.
(Cortesía de E. I. Du Pont de Nemours & Co., Wilmington, Del.)

el aluminio. Por estas propiedades favorables, los compuestos de fibras reforzadas con carbono y aramida han sustituido a los metales en muchas aplicaciones aeroespaciales.

12.3 MATERIALES COMPUESTOS DE PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA

12.3.1 Materiales matriz para materiales compuestos de plástico reforzado con fibra

Dos de las matrices de resinas de plástico más importantes para los plásticos reforzados con fibra son las resinas de poliéster no saturado y las resinas epóxicas. Las reacciones químicas causantes de las ligaduras cruzadas de esas resinas termofijas se describieron en la sección 10.9.

Algunas propiedades de las resinas de poliéster y de las epóxicas rígidas fundidas sin relleno se mencionan en la tabla 12.2. Las resinas de poliéster cuestan menos, pero de ordinario no son tan resistentes como las resinas epóxicas. El poliéster no saturado se usa ampliamente en matrices de plásticos reforzados con fibras. Entre las aplicaciones de esos materiales se encuentran los cascos de las lanchas, paneles de construcción y paneles estructurales para automóviles, aviones y aparatos electrodomésticos. Las resinas epóxicas cuestan más pero tienen ventajas especiales, como son las buenas propiedades de resistencia y menor contracción que las resinas de poliéster después de ser curadas. Las resinas epóxicas se usan de ordinario como materiales aglutinantes para compuestos con fibras de carbono y de aramida.

Tabla 12.2 Algunas propiedades de las resinas de poliéster y epóxicas moldeadas sin relleno

	Poliéster	Epóxica
Resistencia a la tensión, ksi (MPa)	6-13 (40-90)	8-19 (55-130)
Módulo de elasticidad bajo tensión, Msi (GPa)	0.30-0.64 (2.0-4.4)	0.41-0.61 (2.8-4.2)
Esfuerzo de fluencia a la flexión, ksi (MPa)	8.5-23 (60-160)	18.1 (125)
Resistencia al impacto (prueba Izod de resiliencia), pie · lb/pulg (J/m) con muesca	0.2-0.4 (10.6-21.2)	0.1-1.0 (5.3-53)
Densidad (g/cm^3)	1.10-1.46	1.2-1.3

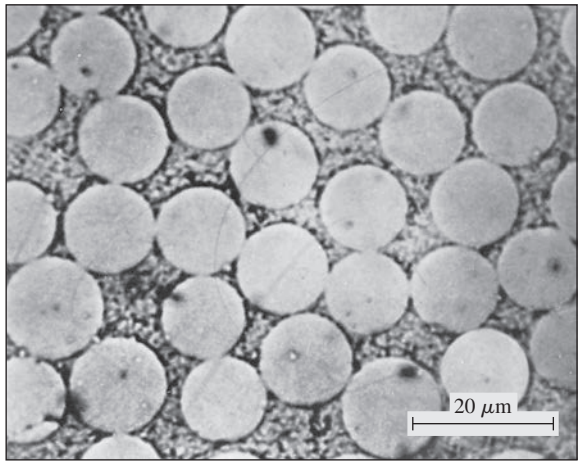


Figura 12.10
Microfotografía de la sección transversal de un material compuesto de fibra de vidrio-poliéster unidireccional.
(Según D. Hull, "An Introduction to Composite Materials", Cambridge, 1981, p. 63.)

12.3.2 Materiales compuestos de plásticos reforzados con fibras

Resinas de poliéster reforzadas con fibra de vidrio La resistencia de los plásticos reforzados con fibra de vidrio depende sobre todo del contenido de vidrio del material y del arreglo de las fibras de vidrio. En general, mientras más alto es el porcentaje en peso de vidrio en el compuesto, tanto más resistente es el plástico reforzado. Cuando hay hilos de vidrio en dirección paralela, como puede ocurrir en el caso del embobinado de los filamentos, el contenido de fibra de vidrio puede ser hasta de 80% en peso, lo cual conduce a valores de resistencia muy altos para el material compuesto. La figura 12.10 es la microfotografía de la sección transversal de un material compuesto de resina poliéster y fibra de vidrio con fibras unidireccionales.

Cualquier desviación de la alineación paralela de los hilos de vidrio reduce la resistencia mecánica del compuesto de fibra de vidrio. Por ejemplo, los compuestos hechos

Tabla 12.3 Algunas propiedades mecánicas de los compuestos de poliéster y fibra de vidrio

	Tela tejida	*Roving* triturado	Compuesto de moldeo de lámina
Resistencia a la tensión, ksi (MPa)	30-50 (206-344)	15-30 (103-206)	8-20 (55-138)
Módulo de tensión elástica, Msi (GPa)	1.5-4.5 (103-310)	0.80-2.0 (55-138)	
Resistencia al impacto, barra con muesca, Izod pie · lb/pulg (J/m)	5.0-30 (267-1600)	2.0-20.0 (107-1070)	7.0-22.0 (374-1175)
Densidad (g/cm^3)	1.5-2.1	1.35-2.30	1.65-2.0

Tabla 12.4 Algunas propiedades mecánicas típicas de un compuesto unidireccional comercial laminado de fibras de carbono (62% en volumen) y resina epóxica

Propiedades	Longitudinal (0°)	Transversal (90°)
Resistencia a la tensión, ksi (MPa)	270 (1860)	9.4 (65)
Módulo de tensión elástica Msi (GPa)	21 (145)	1.36 (9.4)
Deformación por tensión en el punto de ruptura (%)	1.2	0.70

Fuente: Hercules, Inc.

con telas de fibra de vidrio tejidas tienen menor resistencia a causa de su enlace, que si todas las hebras de vidrio fueran paralelas (tabla 12.3). Si el *roving* es triturado, con lo cual se produce un arreglo aleatorio de las fibras de vidrio, la resistencia es más baja en una dirección específica, pero es igual en todas las demás direcciones (tabla 12.3).

Resinas epóxicas reforzadas con fibra de carbono En materiales compuestos a base de fibras de carbono, las fibras aportan las propiedades de alta rigidez y resistencia a la tensión, mientras que el aglutinante (la matriz) es el vehículo para la alineación de las fibras y aporta cierta resistencia al impacto. Las resinas epóxicas son, por amplio margen, las matrices que se usan más comúnmente para las fibras de carbono, pero en ciertas aplicaciones pueden usarse otras resinas, como las polimidas, sulfuros de polifenileno o polisulfonas.

La principal ventaja de las fibras de carbono son sus altos valores de resistencia y módulo de elasticidad (tabla 12.1) combinados con su baja densidad. Por esta razón, los compuestos de fibra de carbono están sustituyendo a los metales en algunas aplicaciones aeroespaciales donde el ahorro en peso es importante (figura 12.1). En la tabla 12.4 se da una lista de algunas propiedades mecánicas típicas de un tipo de material compuesto epóxico con fibra de carbono que contiene 62 por ciento, en volumen, de fibras de carbono. En la figura 12.11 se muestran las propiedades excepcionales, en términos de fatiga, de un material compuesto unidireccional de carbono (grafito)-epóxico, en comparación con las de una aleación de aluminio 2024-T3.

En las estructuras diseñadas para ingeniería, el material epóxico con fibra de carbono está **laminado**, por lo cual se pueden satisfacer a la medida diferentes requisitos de resistencia (figura 12.12). La figura 12.13 es la microfotografía de un material compuesto epóxico con fibra de carbono bidireccional después del curado.

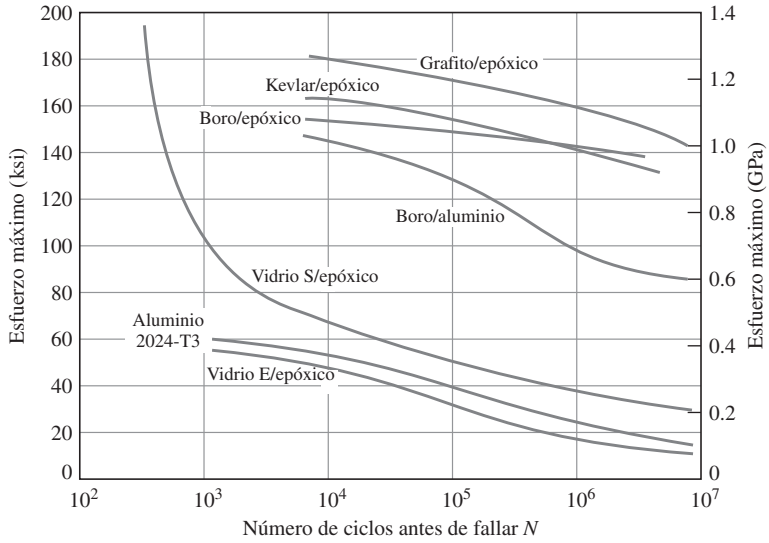


Figura 12.11
Propiedades de fatiga (esfuerzo máximo *versus* número de ciclos antes de la falla) de un material compuesto epóxico de carbono (grafito) unidireccional, en comparación con las propiedades de fatiga de otros materiales compuestos y de la aleación de aluminio 2024-T3. *R* (prueba de esfuerzo mínimo-esfuerzo máximo para la prueba cíclica de esfuerzo-esfuerzo) = 0.1 a temperatura ambiente.
(Cortesía de Hercules, Inc.)

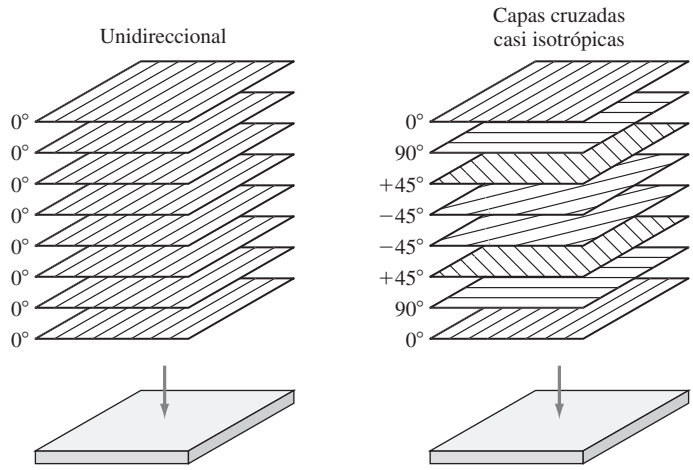


Figura 12.12
Capas de **laminado unidireccional** y **multidireccional** para un compuesto laminado.
(Cortesía de Hercules, Inc.)

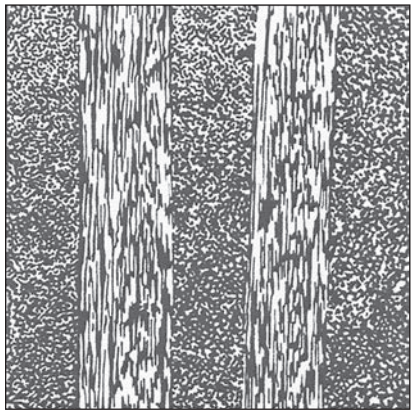


Figura 12.13
Fotomicrografía de un compuesto bidireccional con cinco capas de material compuesto epóxico reforzado con fibra de carbono.
(Según J. J. Dwyer, Composites, Am. Mach., 13 de julio de 1979, pp. 87-96.)

PROBLEMA DE EJEMPLO 12.1

Un compuesto unidireccional epóxico reforzado con fibra Kevlar 49 contiene 60 por ciento en volumen de fibras Kevlar 49 y 40 por ciento de resina epóxica. La densidad de las fibras Kevlar 49 es 1.48 Mg/m^3 y la de la resina epóxica es 1.20 Mg/m^3. *a*) ¿Cuáles son los porcentajes en peso de Kevlar 49 y de resina epóxica en el material compuesto y *b*) ¿cuál es la densidad promedio del compuesto?

■ Solución

La base es 1 m^3 de material compuesto. Por tanto, se tienen 0.60 m^3 de Kevlar 49 y 0.40 m^3 de resina epóxica. Densidad = masa/volumen, o

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad \text{y} \qquad m = \rho V$$

a) Masa de Kevlar 49 $= \rho V = (1.48\ \text{Mg/m}^3)(0.60\ \text{m}^3) = 0.888\ \text{Mg}$
Masa de resina epóxica $= \rho V = (1.20\ \text{Mg/m}^3)(0.40\ \text{m}^3) = \underline{0.480\ \text{Mg}}$
Masa total $= 1.368\ \text{Mg}$

$$\%\ \text{en peso de Kevlar 49} = \frac{0.888\ \text{Mg}}{1.368\ \text{Mg}} \times 100\% = 64.9\%$$

$$\%\ \text{en peso de resina epóxica} = \frac{0.480\ \text{Mg}}{1.368\ \text{Mg}} \times 100\% = 35.1\%$$

b) La densidad promedio del compuesto es

$$\rho_c = \frac{m}{V} = \frac{1.368\ \text{Mg}}{1\ \text{m}^3} = 1.37\ \text{Mg/m}^3 \blacktriangleleft$$

12.3.3 Ecuaciones para el módulo elástico de un compuesto laminar con matriz de plástico reforzada con fibras continuas en condiciones de isodeformación e isoesfuerzo

Condiciones de isodeformación Considérese una muestra de prueba de un compuesto laminoso ideal formado por capas alternas de fibras continuas y materiales matriz como se ilustra en la figura 12.14. En este caso, el esfuerzo sobre el material provoca una deformación uniforme en todas las capas del compuesto. Supongamos que la ligadura entre las capas se mantiene intacta mientras están sometidas al esfuerzo. Este tipo de carga sobre la muestra del material compuesto se conoce como *condición de isodeformación.*

Obténgase ahora una ecuación para relacionar el módulo elástico del compuesto, en función de los módulos elásticos de la fibra y la matriz, y sus porcentajes en volumen. En primer lugar, la carga sobre la estructura del compuesto es igual a la suma de las cargas sobre las capas de fibra más las cargas sobre las capas de matriz, o sea

$$P_c = P_f + P_m \tag{12.1}$$

Como $\sigma = P/A$, o $P = \sigma A$,

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \tag{12.2}$$

donde σ_c, σ_f , σ_m son los esfuerzos y A_c, A_f y A_m son las áreas fraccionales del compuesto, la fibra y la matriz, respectivamente. Puesto que las longitudes de las capas de matriz y fibra son iguales, las áreas A_c, A_f y A_m de la ecuación 12.2 pueden ser sustituidas por las fracciones de volumen V_c, V_f y V_m, respectivamente:

$$\sigma_c V_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \tag{12.3}$$

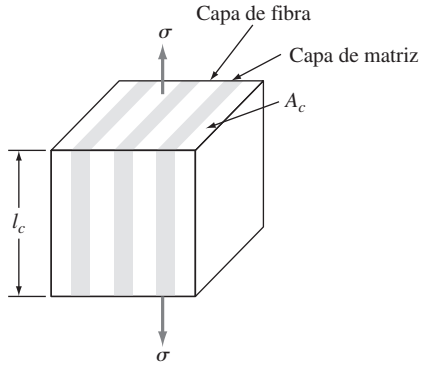


Figura 12.14
Estructura de un compuesto formado por capas de fibra y de matriz en condiciones de isodeformación bajo carga. (Volumen del compuesto V_c = área $A_c \times$ longitud l_c.)

Como la fracción de volumen del compuesto total es 1, entonces $V_c = 1$ y la ecuación 12.3 se convierte en

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \tag{12.4}$$

Para condiciones de isodeformación y suponiendo una buena unión entre las capas del compuesto,

$$\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m \tag{12.5}$$

Dividiendo la ecuación 12.4 entre la ecuación 12.5, y considerando que todas las deformaciones son iguales, resulta

$$\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_f V_f}{\epsilon_f} + \frac{\sigma_m V_m}{\epsilon_m} \tag{12.6}$$

Ahora se puede sustituir el módulo de elasticidad E_c por σ_c/ϵ_c, E_f por σ_f/ϵ_f y E_m por σ_m/ϵ_m, con lo que se obtiene

$$\boxed{E_c = E_f V_f + E_m V_m} \tag{12.7}$$

Esta ecuación se conoce como la *regla de mezclas para compuestos binarios* y permite calcular un valor para el módulo elástico de un compuesto si se conocen los módulos elásticos de la fibra y la matriz, así como sus porcentajes en volumen.

Ecuaciones para las cargas sobre las regiones de fibra y de matriz de una estructura compuesta laminar cargada en condiciones de isodeformación La relación entre las cargas sobre las regiones de fibra y de matriz de un material compuesto binario deformado en condiciones de isodeformación puede obtenerse a partir de sus relaciones $P = \sigma A$. Así, como $\sigma = E\epsilon$ y $\epsilon_f = \epsilon_m$,

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_m A_m} = \frac{E_f \epsilon_f A_f}{E_m \epsilon_m A_m} = \frac{E_f A_f}{E_m A_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \tag{12.8}$$

Si se conoce la carga total sobre un espécimen tensionado en condiciones de isodeformación, entonces puede aplicarse la siguiente ecuación:

$$P_c = P_f + P_m \tag{12.9}$$

donde P_c, P_f y P_m son las cargas sobre el compuesto en total, la región de fibra y la región de matriz, respectivamente. Combinando la ecuación 12.9 con la ecuación 12.8, la carga sobre cada una de las regiones de fibra y de matriz se puede determinar si se conocen los valores correspondientes a E_f, E_m, V_f, V_m y P_c.

PROBLEMA DE EJEMPLO 12.2

Calcule *a*) el módulo de elasticidad, *b*) la resistencia a la tensión y *c*) la fracción de la carga soportada por la fibra en los siguientes materiales compuestos sometidos a esfuerzo en condiciones de isodeformación. El compuesto es una resina continua de vidrio-fibra-reforzada-epóxica producida utilizando 60 por ciento en volumen de fibras de vidrio E con un módulo de elasticidad de $E_f = 10.5 \times 10^6$ psi y una resistencia a la tensión de 350 000 psi, y una resina epóxica endurecida con un módulo de $E_m = 0.45 \times 10^6$ psi y una resistencia a la tensión de 9 000 psi.

■ **Solución**

a) El módulo de elasticidad del compuesto es

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \qquad \textbf{(12.7)}$$
$$= (10.5 \times 10^6 \text{ psi})(0.60) + (0.45 \times 10^6 \text{ psi})(0.40)$$
$$= 6.30 \times 10^6 \text{ psi} + 0.18 \times 10^6 \text{ psi}$$
$$= 6.48 \times 10^6 \text{ psi (44.6 GPa)} \blacktriangleleft$$

b) La resistencia a la tensión del compuesto es

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \qquad \textbf{(12.4)}$$
$$= (350\,000 \text{ psi})(0.60) + (9\,000 \text{ psi})(0.40)$$
$$= 210\,000 + 3\,600 \text{ psi}$$
$$= 214\,000 \text{ psi o } 214 \text{ ksi (1.47 GPa)} \blacktriangleleft$$

c) La fracción de la carga que soporta la fibra es

$$\frac{P_f}{P_c} = \frac{E_f V_f}{E_f V_f + E_m V_m}$$
$$= \frac{(10.5 \times 10^6 \text{ psi})(0.60)}{(10.5 \times 10^6 \text{ psi})(0.60) + (0.45 \times 10^6 \text{ psi})(0.40)}$$
$$= \frac{6.30}{6.30 + 0.18} = 0.97 \blacktriangleleft$$

Condiciones de isoesfuerzo Considérese ahora el caso de una estructura compuesta laminar ideal formada por capas de fibra y de matriz, en la que las capas son perpendiculares a la deformación aplicada, como se muestra en la figura 12.15. En este caso, el esfuerzo sobre la estructura del compuesto produce una condición de

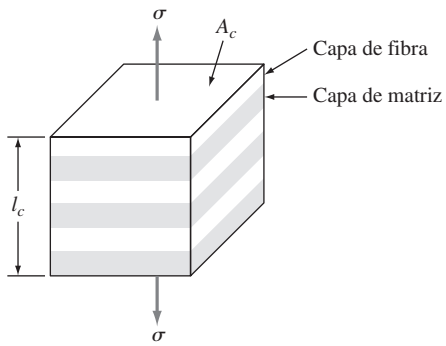


Figura 12.15
Estructura de un material compuesto formado por capas de fibra y de matriz (aglutinante) en condiciones de carga con isoesfuerzo. (Volumen del compuesto V_c = área A_c × longitud l_c.)

esfuerzos iguales sobre todas las capas, por lo cual recibe el nombre de *condición de isoesfuerzo*.

A fin de obtener una ecuación para el módulo elástico del compuesto en capas con este tipo de carga, se comienza con una ecuación donde se señala que el esfuerzo sobre la estructura total del compuesto es igual al esfuerzo sobre las capas de fibra y al esfuerzo sobre las capas de matriz. Así,

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m \tag{12.10}$$

Por tanto, la deformación total del compuesto en las direcciones de los esfuerzos es igual a la suma de las deformaciones en las capas de fibra y de matriz,

$$\epsilon_c = \epsilon_f + \epsilon_m \tag{12.11}$$

Suponiendo que el área perpendicular al esfuerzo no se modifique después de aplicarlo y suponiendo una longitud unitaria para el compuesto después de haberlo sometido al esfuerzo, resulta que

$$\epsilon_c = \epsilon_f V_f + \epsilon_m V_m \tag{12.12}$$

donde V_f y V_m son las fracciones de volumen de las láminas de fibra y de matriz, respectivamente.

Suponiendo que la ley de Hooke es válida bajo la carga, entonces

$$\epsilon_c = \frac{\sigma}{E_c} \qquad \epsilon_f = \frac{\sigma}{E_f} \qquad \epsilon_m = \frac{\sigma}{E_m} \tag{12.13}$$

Sustituyendo las ecuaciones de la ecuación 12.13 en la ecuación 12.12 resulta

$$\frac{\sigma}{E_c} = \frac{\sigma V_f}{E_f} = \frac{\sigma V_m}{E_m} \tag{12.14}$$

Dividiendo cada término de la ecuación 12.14 entre σ, resulta

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \tag{12.15}$$

Encontrando un común denominador, se tiene

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f E_m}{E_f E_m} + \frac{V_m E_f}{E_m E_f} \tag{12.16}$$

Reordenando,

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f E_m + V_m E_f}{E_f E_m}$$

o

$$E_c = \frac{E_f E_m}{V_f E_m + V_m E_f} \tag{12.17}$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 12.3

Calcule el módulo de elasticidad de un material compuesto que consiste en 60 por ciento en volumen de fibra de vidrio E continua y 40 por ciento de resina epóxica como la matriz, cuando se somete a esfuerzo en *condiciones de isoesfuerzo* (es decir, el material se somete a esfuerzo en dirección perpendicular a las fibras continuas). El módulo de elasticidad del vidrio E es 10.5×10^6 psi y el de la resina epóxica es 0.45×10^6 psi.

■ **Solución**

$$E_c = \frac{E_f E_m}{V_f E_m + V_m E_f} \tag{12.17}$$

$$= \frac{(10.5 \times 10^6 \text{ psi})(0.45 \times 10^6 \text{ psi})}{(0.60)(0.45 \times 10^6) + (0.40)(10.5 \times 10^6)}$$

$$= \frac{4.72 \times 10^{12} \text{ psi}^2}{0.27 \times 10^6 \text{ psi} + 4.20 \times 10^6 \text{ psi}}$$

$$= 1.06 \times 10^6 \text{ psi (7.30 GPa)} \blacktriangleleft$$

Obsérvese que la condición de isoesfuerzo que existe al someter a esfuerzo al material compuesto, resulta en un módulo de elasticidad para el material compuesto de 60 por ciento de fibra de vidrio E-40 por ciento epóxico, que es casi seis veces menor al obtenido si el esfuerzo se aplica en condiciones de isodeformación.

La representación esquemática donde se compara la carga sobre una estructura en capas de un compuesto sometido a carga bajo isodeformación y bajo isoesfuerzo (figura 12.16) muestra que los valores más altos del módulo se obtienen cargando en condiciones de isodeformación con iguales volúmenes de fibras.

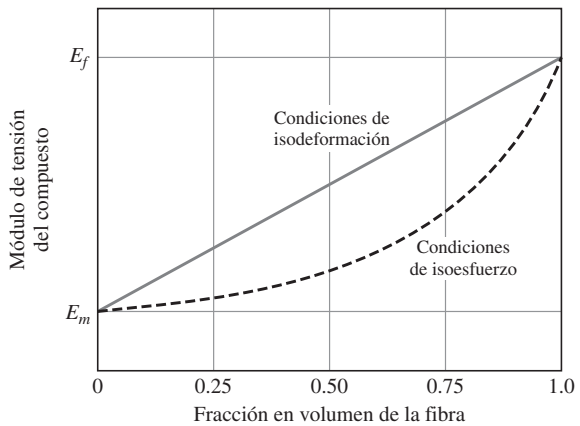


Figura 12.16
Representación esquemática del módulo de tensión elástico en función de la fracción del volumen de la fibra en un compuesto laminado unidireccional de matriz de plástico reforzada con fibra sometido a carga en condiciones de isodeformación e isoesfuerzo. Para una determinada fracción en volumen de fibra del compuesto, el material cargado en condiciones de isodeformación tiene un módulo más alto.

12.4 PROCESOS DE MOLDE ABIERTO PARA MATERIALES COMPUESTOS DE PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA

Existen muchos métodos de molde abierto que se usan para producir plásticos reforzados con fibra. Ahora se analizarán brevemente algunos de los más importantes.

12.4.1 Proceso de colocación manual de capas

Éste es el método más sencillo para producir una pieza reforzada con fibra. La producción de una pieza con el proceso de **colocación manual de capas** usando fibra de vidrio y un poliéster comienza con la aplicación de una capa de gel en el molde abierto (figura 12.17*a*). El refuerzo de fibra de vidrio que normalmente viene en forma de tela o colchoneta se coloca en forma manual en el molde. A continuación se aplica la resina básica mezclada con catalizadores y aceleradores, vertiéndola ya sea con un cepillo o por aspersión. Se usan rodillos (figura 12.17*b*) o escurridores para empapar perfectamente la resina con el refuerzo y expulsar el aire atrapado. Se agregan capas de colchoneta de fibra de vidrio o *roving* tejido y resina para aumentar el grosor de las paredes de la pieza que se fabrica. Este método tiene aplicación en cascos de embarcaciones, depósitos, cubiertas protectoras y paneles de construcción.

12.4.2 Proceso de aspersión

El **método de aspersión** para producir recubrimientos de plástico reforzado con fibra es similar al método de colocación manual de placas y puede usarse para fabricar cas-

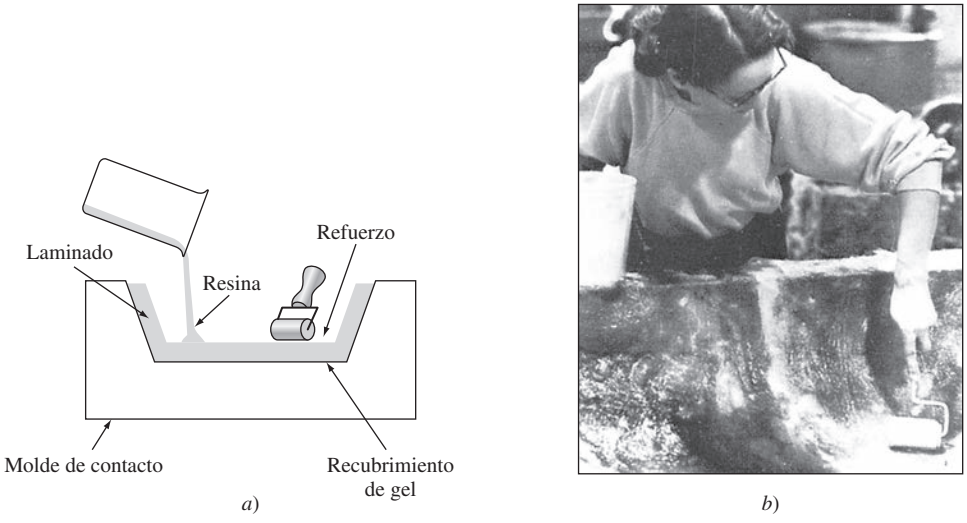


Figura 12.17
Método de colocación manual de capas para moldear materiales compuestos de plástico reforzado con fibras. *a*) Se vierte la resina sobre el refuerzo que está en el molde. *b*) Se usa un rodillo para aumentar la densidad del laminado y expulsar el aire atrapado.
(Cortesía de Owens/Corning Fiberglas Co.)

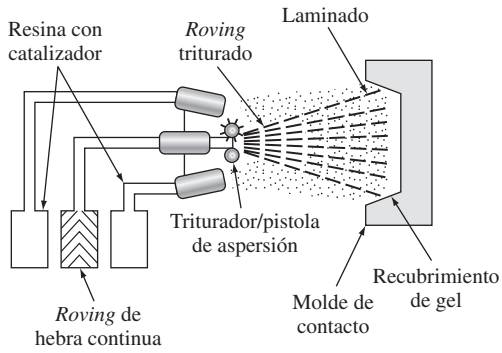


Figura 12.18
Método de aspersión para moldear materiales compuestos de plástico reforzado con fibra; algunas ventajas de este método son que permite mayor complejidad en la forma de las partes moldeadas y brinda la posibilidad de automatizar el proceso.
(Cortesía de Owens/Corning Fiberglas Co.)

cos de embarcaciones, unidades de tina de baño y ducha, y otras formas de mediano o gran tamaño. Si se usa fibra de vidrio en este proceso, el *roving* de hebra continua se alimenta a través de una combinación de triturador y pistola de aspersión (figura 12.18) que deposita simultáneamente dentro del molde el *roving* triturado y la resina con catalizador. El laminado depositado se densifica después con un rodillo o escurridor para expulsar el aire y asegurarse de que la resina impregne las fibras de refuerzo. Se pueden agregar múltiples capas para obtener el grosor deseado. El curado suele realizarse a temperatura ambiente o puede acelerarse con la aplicación de una dosis moderada de calor.

12.4.3 Proceso de bolsa de vacío en autoclave

El proceso de **moldeo en bolsa de vacío** se usa para producir laminados de alto rendimiento, generalmente de sistemas epóxicos reforzados con fibra. Los materiales compuestos producidos con este método son de importancia particular en aplicaciones de aeronáutica y aeroespaciales (figura 12.1).

Ahora se examinarán los distintos pasos que se requieren en este proceso para producir una pieza acabada. Primero, una lámina larga y delgada, que puede ser de unas 60 pulgadas (152 cm) de ancho, o material epóxico con fibras de carbono **preimpregnado (prepreg)**, se coloca sobre una mesa grande (figura 12.19). El material prepreg está formado por largas fibras de carbono en una matriz epóxica parcialmente curada. A continuación se recortan trozos de la lámina prepreg y se colocan unos sobre otros en un molde para formar un laminado (figura 12.20). Las capas o *pliegues*, como se les llama también, pueden colocarse en distintas direcciones para producir el patrón de resistencia deseado, ya que la más alta resistencia de cada pliegue se encuentra en dirección paralela a las fibras (figura 12.12).

Una vez que el laminado ha sido fabricado, tanto el molde como el laminado se introducen en una bolsa de vacío para extraer el aire atrapado en el interior de la par-

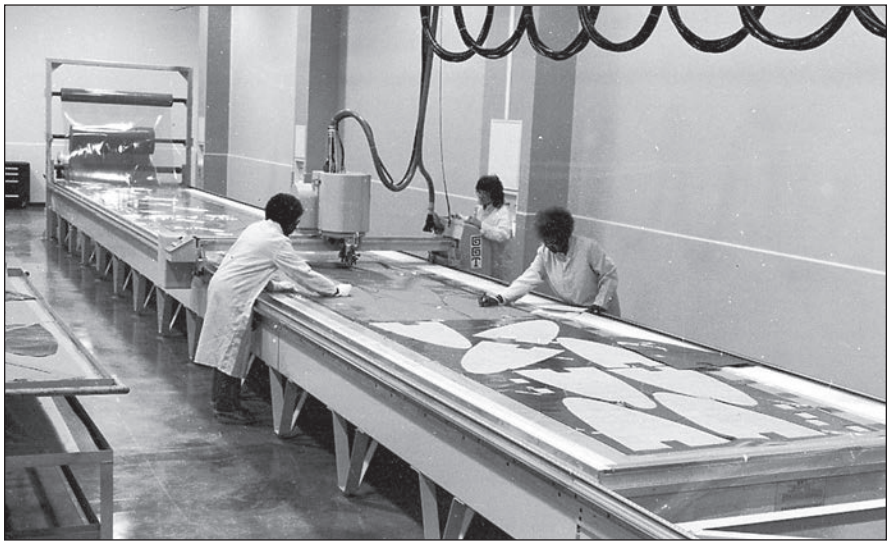


Figura 12.19
Lámina preimpregnada epóxica con fibras de carbono que está siendo cortada con una sierra computarizada en la planta de materiales compuestos de McDonnell Douglas.
(Cortesía de McDonnell Douglas Corp.)

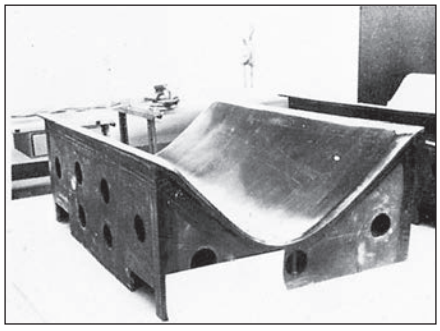


Figura 12.20
Molde de maquinado de contornos lisos para formar laminados a partir de capas múltiples de material compuesto de plástico reforzado con fibra y preimpregnado.
(Cortesía de Northrop Co.)

te laminada. Por último, la bolsa de vacío que contiene el laminado y el molde de maquinado se introducen en una autoclave para el curado final de la resina epóxica (figura 12.21). Las condiciones de curado varían según el material de que se trate, pero el material compuesto epóxico con fibra de carbono se calienta de ordinario a unos 190°C (375°F), a 100 psi de presión, aproximadamente. Después de sacarla de la autoclave, la parte compuesta se separa de su molde de maquinado quedando lista para otras operaciones de acabado.

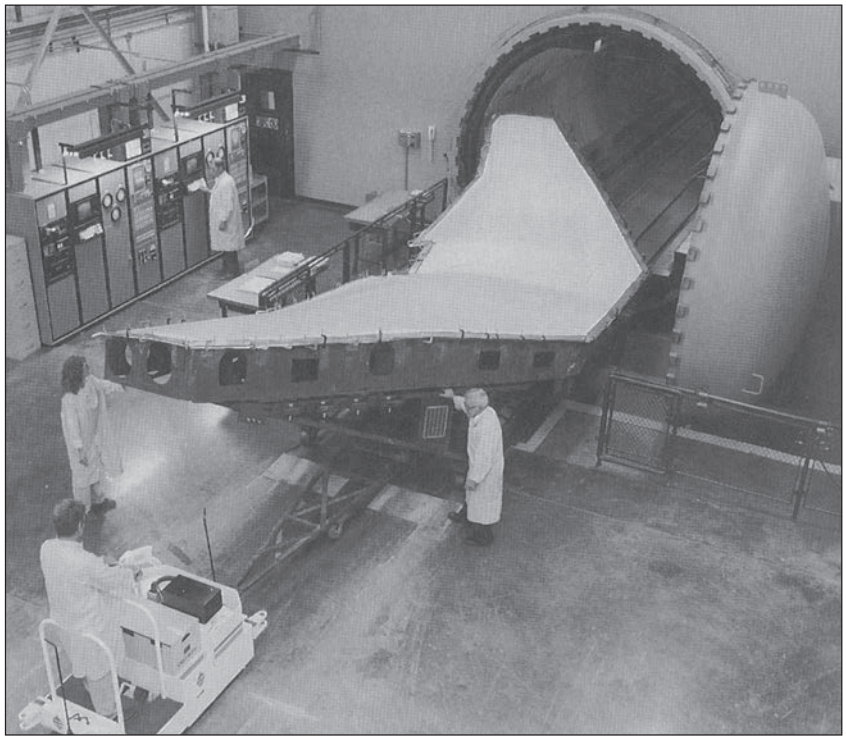


Figura 12.21
Este laminado epóxico con fibras de carbono de una sección de ala de AV-8B y su molde de maquinado se introducen en una autoclave para curarlos en la planta de McDonnell Aircraft Co.
(Cortesía de McDonnell Douglas Corp.)

Los materiales compuestos epóxicos con fibras de carbono se usan sobre todo en la industria aeroespacial, donde la alta resistencia, rigidez y ligereza del material pueden aprovecharse plenamente. Por ejemplo, este material se usa en la fabricación de alas de avión, partes de elevadores y de timones, y en las puertas del compartimiento de carga de los transbordadores espaciales. Consideraciones de costo han impedido el uso generalizado de este material en la industria automotriz.

12.4.4 Proceso de embobinado del filamento

Otro proceso importante de molde abierto para producir cilindros huecos de alta resistencia es el **proceso de embobinado del filamento**. En este proceso, el refuerzo de fibra se alimenta mediante un baño de resina y luego se enrolla en un mandril adecuado (figura 12.22). Cuando ya se han aplicado suficientes capas, el mandril donde éstas están enrolladas es curado ya sea a temperatura ambiente o en un horno a elevadas temperaturas. Finalmente, la parte moldeada se extrae del mandril.

El alto grado de orientación de las fibras y la elevada carga de fibras que se obtienen con este método producen cilindros huecos con resistencia a la tensión extremadamente alta. Entre las aplicaciones de este proceso se encuentran la fabricación de tanques de almacenamiento para productos químicos y combustibles, recipientes a presión y cubiertas de motores de cohetes (figura 12.23).

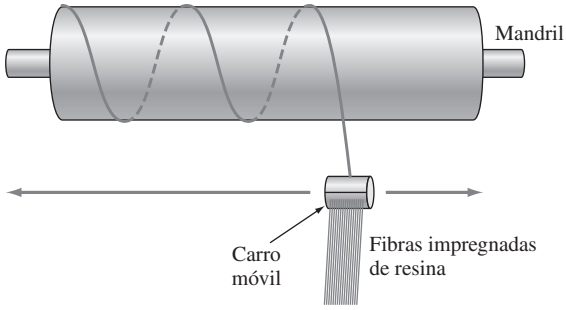


Figura 12.22
Proceso de embobinado de filamentos para producir materiales compuestos de plástico reforzado con fibras. Las fibras se impregnan primero con resina plástica y luego se enrollan en un mandril giratorio (tambor). El carro que contiene las fibras impregnadas de resina se mueve durante la operación de enrollado y va depositando las fibras impregnadas.
(Según H. G. DeYoung, Plastic Composites Fight for Status, High Technol., octubre de 1983, p. 63. © High Technology Publishing Co. Reproducido con autorización.)

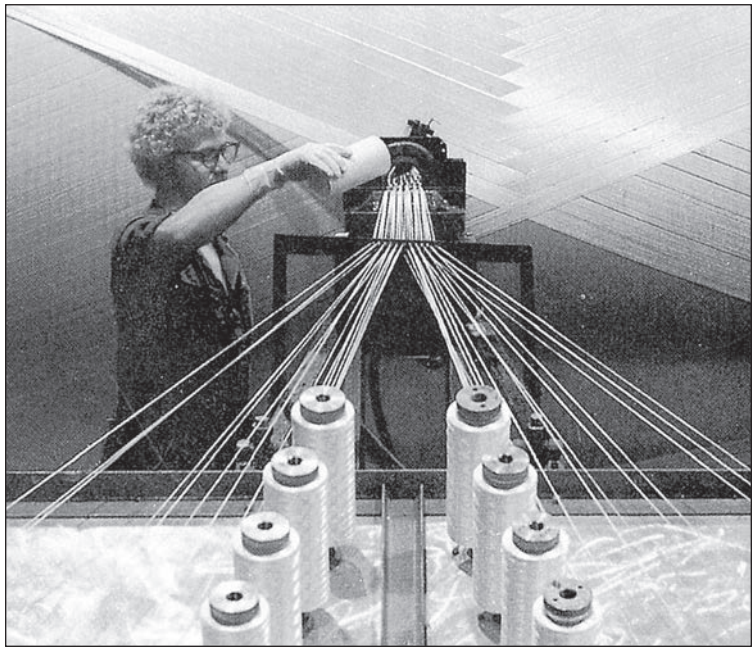


Figura 12.23
Devanado de fibras para la cubierta de un motor de un cohete utilizando la fibra Kevlar 49 y resina epóxica.
(Cortesía de la Du Pont Co.)

12.5 PROCESOS DE MOLDE CERRADO PARA MATERIALES COMPUESTOS DE PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA

Muchos métodos de molde cerrado se usan para producir materiales de plástico reforzados con fibra. A continuación se analizarán brevemente algunos de los más importantes.

12.5.1 Moldeo por compresión e inyección

Éstos son dos de los procesos más importantes que se usan en grandes volúmenes para producir plásticos reforzados con fibras en moldes cerrados. Estos procesos son en esencia los mismos que se analizaron en la sección 10.6 para materiales plásticos, salvo que el refuerzo de fibra se mezcla con la resina antes del procesado.

12.5.2 El proceso del compuesto para moldeo de placas (CMP)

El proceso del **compuesto para moldeo de placas** es uno de los procedimientos más novedosos de molde cerrado que se usan para producir partes de plástico reforzado con fibra, sobre todo en la industria automotriz. Este proceso permite tener un excelente control de la resina y obtener buenas propiedades de resistencia mecánica (tabla 12.3) en la fabricación de productos sumamente uniformes, de gran tamaño, en altos volúmenes.

El compuesto para moldeo de placas se suele manufacturar en un proceso de flujo continuo altamente automatizado. El *roving* de fibra de vidrio de hilos continuos se corta en longitudes de unas 2 pulgadas (5.0 cm) y se deposita en una capa

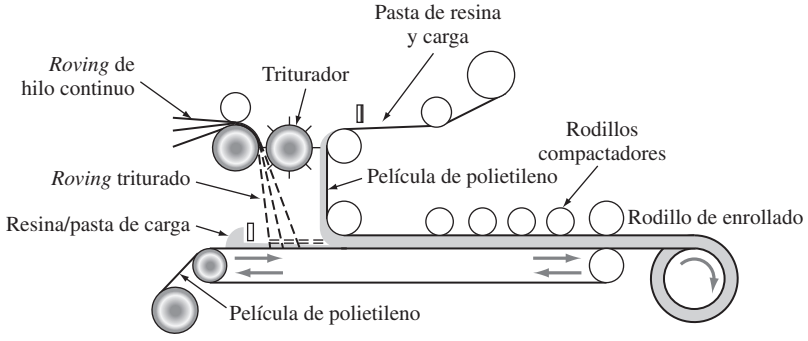


Figura 12.24
Proceso de manufactura de un compuesto para moldeo de placas. La máquina que se ilustra produce un sándwich de fibra de vidrio y pasta de carga y resina entre dos delgadas láminas de película de polietileno. El compuesto para moldeo de placas así producido tiene que envejecerse antes de prensarse para obtener un producto terminado.
(Cortesía de Owens/Corning Fiberglas Co.)

de pasta de resina de relleno que se desplaza sobre una película de polietileno (figura 12.24). Otra capa de pasta con carga y resina se deposita más tarde sobre la primera para formar un sándwich continuo de fibra de vidrio y resina con carga. El sándwich con fondo y tapa de poli-etileno se compacta y se enrolla al tamaño requerido (figura 12.24).

El CMP enrollado se almacena luego en un cuarto de maduración durante un periodo de uno a cuatro días para que la lámina pueda soportar el vidrio. A continuación, los rollos de CMP se llevan cerca de la prensa y se cortan en el patrón de carga apropiado para la parte específica, después de lo cual se colocan en un molde de metal acoplado caliente (300°F [149°C]). Entonces se cierra la prensa hidráulica y el CMP fluye uniformemente a presión (1 000 psi) a través del molde para moldear el producto final. A veces se puede inyectar un recubrimiento dentro del molde a la mitad de la operación de prensado para mejorar la calidad de la superficie de la pieza de CMP.

Las ventajas del proceso CMP sobre los procesos de colocación manual de placas o de aspersión son mayor eficiencia en la producción de altos volúmenes, mejor calidad de las superficies y más uniformidad del producto. El uso del CMP es particularmente conveniente en la industria automotriz para la producción de paneles frontales y paneles con aberturas de rejillas, paneles de carrocería y capós. Por ejemplo, el capó frontal del Chevrolet Corvette 1984 era de CMP (figura 12.25). Este capó en forma de concha de almeja se fabricó uniendo con adhesivo un panel interior de 0.080 pulgadas (0.20 cm) a un panel exterior recubierto en molde de 0.10 pulgadas (0.25 cm).

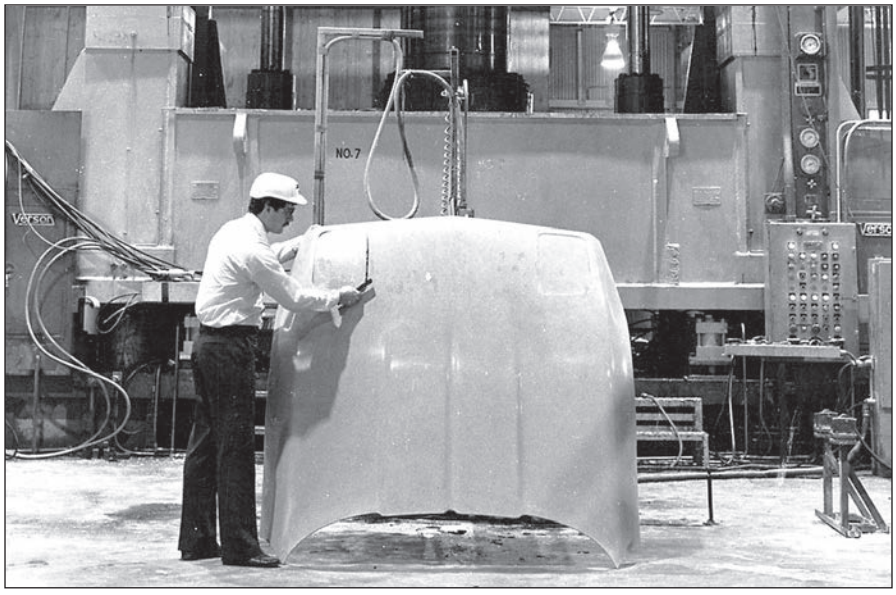


Figura 12.25
Panel exterior del capó frontal del Chevrolet Corvette 1984. Este panel se fabricó con un compuesto para moldeo de placas prensado a 300°F (149°C) a 1 000 psi (6.89 MPa) durante un lapso de 60 a 90 segundos.
(Cortesía de General Tire and Rubber Co., Southfield, Mich.)

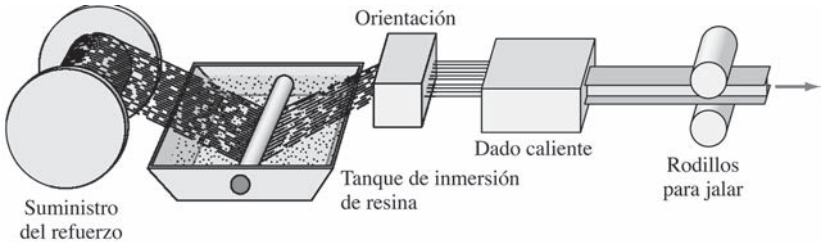


Figura 12.26
Proceso de pultrusión para producir materiales compuestos de plástico reforzado con fibras. Las fibras impregnadas con resina se alimentan en un dado caliente y luego se extraen lentamente como material compuesto curado cuya sección transversal tiene una forma constante.
(Según H. G. De Young, Plastic Composites Fight for Status, High Technol., octubre de 1983, p. 63. © High Technology Publishing Co. Reproducido con autorización.)

12.5.3 Proceso de pultrusión continua

La **pultrusión continua** se usa para fabricar plásticos reforzados con fibras para obtener piezas con sección transversal constante, como perfiles estructurales, vigas, canales, conductos y tuberías. En este proceso, las fibras de hebra continua se impregnan en un baño de resina y luego se hacen pasar por un dado de acero caliente donde se le da forma al material terminado (figura 12.26). Es posible alcanzar resistencias muy altas con este material por la alta concentración de fibras y su orientación, paralela a la longitud del material sometido a tensión.

12.6 CONCRETO

El concreto es un importante material de ingeniería que se usa en la construcción de estructuras. Los ingenieros civiles usan el concreto, por ejemplo, en el diseño y construcción de puentes, edificios, presas, muros de retén y división, así como en pavimentos de carreteras. En Estados Unidos se produjeron unas 50×10^7 toneladas de concreto en 1982, cantidad considerablemente mayor que las 6×10^7 toneladas de acero que se produjeron en el mismo año. Como material de construcción, el concreto tiene muchas ventajas, tales como economía, durabilidad, resistencia al fuego, capacidad de ser fabricado *in situ*, apariencia estética y flexibilidad de diseño porque puede ser moldeado. Las desventajas del concreto, desde el punto de vista de la ingeniería, son baja resistencia a la tensión, poca ductilidad y cierta contracción.

El **concreto** es un material cerámico compuesto constituido por material granular grueso (el **agregado**) incrustado en una matriz dura de pasta de cemento (el aglutinante) que suele estar hecho de cemento portland[3] y agua. El concreto varía mucho en su composición, pero generalmente contiene (en volumen absoluto) de 7 a

[3] El cemento portland recibe su nombre de la pequeña península que se encuentra en la costa sur de Inglaterra, donde la piedra caliza guarda cierto parecido con el cemento portland.

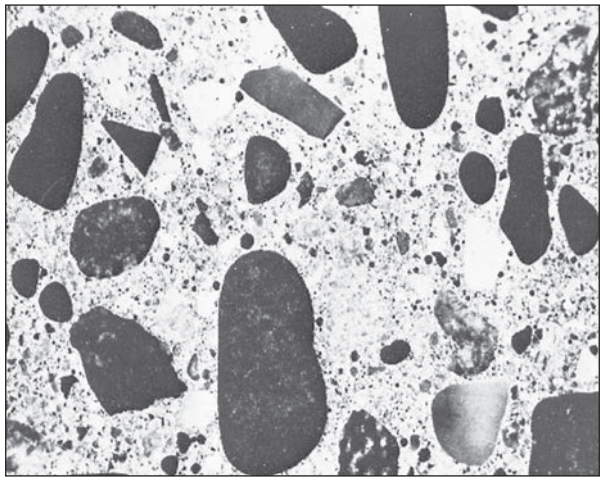


Figura 12.27
Sección transversal de concreto endurecido. Una pasta de cemento y agua recubre completamente cada partícula de agregado y llena los espacios entre las partículas para formar un material cerámico compuesto.
(Según "Design and Control of Concrete Mixtures", 12a. ed., Portland Cement Association, 1979.)

15 por ciento de cemento portland, de 14 a 21 por ciento de agua, de 0.5 a 8 por ciento de aire, de 24 a 30 por ciento de agregado fino y de 31 a 51 por ciento de agregado grueso. En la figura 12.27 se ilustra una sección pulida de una muestra de concreto endurecido. La pasta de cemento contenida en el concreto actúa como "adhesivo" para mantener juntas las partículas de agregado en este material compuesto. Ahora se examinarán algunas características de los componentes del concreto y se analizarán varias de sus propiedades.

12.6.1 Cemento portland

Producción de cemento portland Las materias primas básicas del **cemento portland** son cal (CaO), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3). Estos componentes se combinan en proporciones adecuadas para producir diversos tipos de cemento portland. Las materias primas seleccionadas se trituran, muelen y agregan en proporciones que varían según la composición deseada, después de lo cual se mezclan. La mezcla se introduce entonces en un horno rotatorio donde se calienta a temperaturas hasta de 1 400 a 1 650°C (2 600 a 3 000°F). En este proceso, la mezcla se convierte químicamente en cemento aglutinado, que después se enfría y pulveriza. Se agrega al cemento una pequeña cantidad de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) para controlar el tiempo de fraguado del concreto.

Composición química del cemento portland Desde un punto de vista práctico, se puede considerar que el cemento portland consiste en cuatro compuestos principales, que son:

Compuesto	Fórmula química	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
Aluminoferrita tricálcica	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF

Tipos de cemento portland Varios tipos de cemento portland se producen modificando su composición química. En general, hay cinco tipos principales cuyas composiciones químicas básicas se muestran en la tabla 12.5.

El *tipo I* es el cemento portland normal de uso general. Se utiliza cuando el concreto no está expuesto a un intenso ataque de sulfatos del suelo o del agua, o cuando no hay reparos en que se presenten incrementos de temperatura a causa del calor generado por la hidratación del cemento. Las aplicaciones típicas del concreto tipo I son en aceras, edificios de concreto reforzado, puentes, alcantarillas, depósitos y embalses.

El cemento portland *tipo II* se usa cuando se puede presentar un ataque moderado de sulfatos, como en las estructuras de drenaje cuando la concentración de sulfato en las aguas subterráneas es más alta de lo normal. El cemento tipo II suele usarse en climas cálidos para estructuras voluminosas, como grandes pilares y muros de contención pesados, ya que este cemento tiene un calor de hidratación moderado.

El cemento portland *tipo III* es un material de fraguado rápido que desarrolla una alta resistencia en sus primeras etapas. Se usa cuando los moldes del concreto de una estructura que debe ser puesta en servicio pronto serán retirados en poco tiempo.

El *tipo IV* es un cemento portland con bajo calor de hidratación que se usa cuando la velocidad y la cantidad del calor generado deben reducirse al mínimo. El cemento tipo IV se usa en estructuras masivas de concreto, como grandes presas de gravedad en las que el calor generado por el fraguado del cemento es un factor crítico.

El *tipo V* es un cemento resistente al sulfato que se usa cuando el concreto estará expuesto a intenso ataque de sulfatos, como en el concreto que está en contacto con suelos y aguas subterráneas con un elevado contenido de sulfatos.

Tabla 12.5 Composiciones típicas de compuestos de cemento portland

Tipo de cemento	Designación ASTM C150	Composiciones (% en peso)*			
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Uso general	I†	55	20	12	9
Calor de hidratación moderado, moderada resistencia al sulfato	II	45	30	7	12
Fraguado rápido	III	65	10	12	8
Calor de hidratación bajo	IV	25	50	5	13
Resistente al sulfato	V	40	35	3	14

*Los porcentajes faltantes corresponden al yeso y a componentes menores como MgO, álcalis, sulfatos, etcétera.

†Éste es el tipo más común de todos los cementos.

Fuente: J. F. Young, *J. Educ. Module Mater. Sci.,* **3:**410 (1981). Reproducido con autorización del *Journal of Materials Education,* University Park, PA.

Fraguado del cemento portland El cemento portland se fragua a causa de las reacciones con el agua conocidas como **reacciones de hidratación**. Estas reacciones son complejas y no se han comprendido del todo. El silicato tricálcico y el silicato dicálcico constituyen cerca de 75 por ciento del cemento portland, en peso, y cuando esos compuestos reaccionan con agua durante el endurecimiento del cemento, el principal producto de la hidratación es el *hidrato de silicato tricálcico*. Este material está formado de partículas extremadamente pequeñas (menos de 1 μm) y es un *gel* coloidal. El hidróxido de calcio se produce también por la hidratación del C_3S y el C_2S, y es un material cristalino. Estas reacciones son

$$2C_3S + 6H_2O \rightarrow C_3S_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$
$$2C_2S + 4H_2O \rightarrow C_3S_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2$$

El silicato tricálcico se endurece con rapidez y es la causa principal de la resistencia que muestra el cemento portland en forma temprana (figura 12.28). Casi toda la hidratación del C_3S tiene lugar en unos dos días, por lo cual los cementos portland de fraguado rápido contienen cantidades más altas de C_3S.

El silicato dicálcico (C_2S) tiene una reacción de hidratación lenta en contacto con el agua y es la causa principal del incremento de resistencia después de transcurrida una semana (figura 12.28). El aluminato tricálcico se hidrata rápidamente con una alta velocidad de liberación de calor. El C_3A contribuye en forma menor al desarrollo del fraguado rápido y se mantiene en un nivel bajo en los cementos resis-

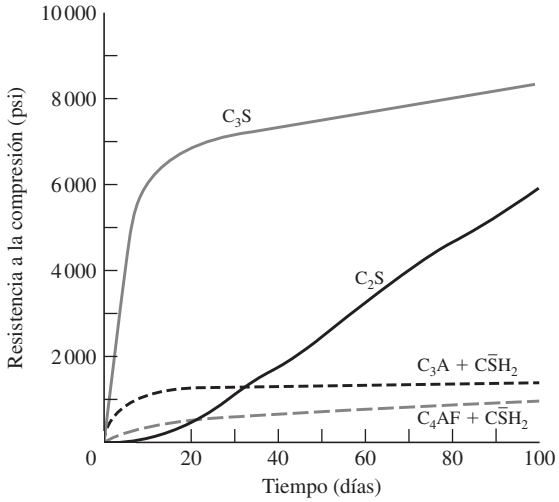


Figura 12.28
Resistencia a la compresión de pastas compuestas de cemento puro, en función del tiempo de fraguado. Obsérvese que $C\bar{S}H_2$ es la fórmula abreviada del $CaSO_4 \cdot 2H_2O$.
*[Según J. F. Young, J. Educ. Module Mater. Sci., **3:**420(1981). Reproducido con autorización del Journal of Materials Education, University Park, Pa.]*

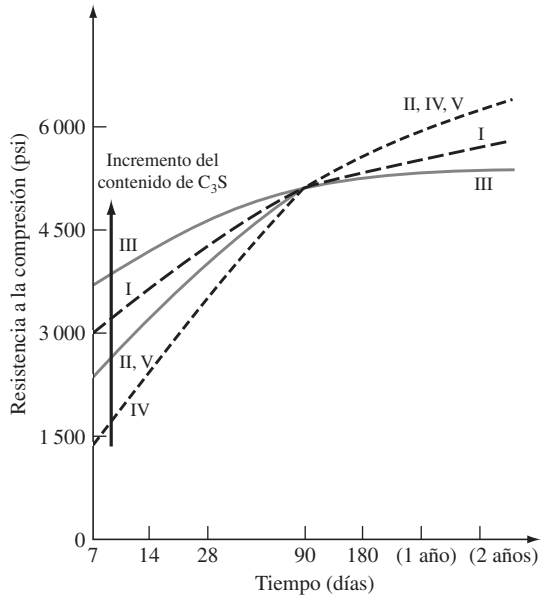


Figura 12.29
Resistencias a la compresión de concretos fabricados con diferentes tipos ASTM de cementos portland en función del tiempo de fraguado.
[Según J. F. Young, J. Educ. Module Mater. Sci., **3:***420(1981). Reproducido con autorización del Journal of Materials Education, University Park, Pa.]*

tentes al sulfato (tipo V) (figura 12.28). La aluminoferrita tricálcica se añade al cemento para reducir la temperatura del cemento aglomerado durante la fabricación del cemento.

El grado en el cual la reacción de hidratación se completa determina la resistencia y durabilidad del concreto. La hidratación es relativamente rápida en los primeros días después que el concreto es colocado en su lugar. Es importante que el agua sea retenida por el concreto en el periodo inicial del fraguado y que se logre evitar o reducir la evaporación.

En la figura 12.29 se muestra la forma en que la resistencia a la compresión de concretos hechos con diferentes cementos tipo ASTM aumenta con el tiempo de fraguado. La mayor parte de la resistencia a la compresión de los concretos se desarrolla en unos 28 días, pero el endurecimiento puede continuar durante varios años.

12.6.2 Agua para mezclar con el concreto

La mayor parte del agua natural potable se puede usar en la elaboración del concreto. Algunas aguas no potables también pueden usarse, pero si el contenido de impurezas llega a ciertos niveles específicos, el agua debe ser sometida a prueba para determinar su efecto sobre la resistencia del concreto.

12.6.3 Agregados para concreto

Los agregados constituyen normalmente entre 60 y 80 por ciento del volumen del concreto e influyen poderosamente en sus propiedades. Los agregados del concreto suelen clasificarse como finos o gruesos. Los agregados finos consisten en partículas de arena hasta de $\frac{1}{4}$ pulg (6 mm), mientras que los agregados gruesos son las partículas retenidas en un tamiz núm. 16 (aberturas de 1.18 mm). Así, hay cierta superposición de los rangos de tamaños de partículas que corresponden a los agregados finos y gruesos. Las piedras forman la mayor parte del agregado grueso, mientras que los minerales (arena) forman la mayor parte de los agregados finos.

12.6.4 Oclusión de aire

Los concretos **ligeros o con aire** ocluido se producen para mejorar su resistencia a las heladas, y esto hace que algunos concretos sean más fáciles de trabajar. A ciertos tipos de cementos portland se les agregan agentes de oclusión de aire, por lo cual se clasifican con la letra A seguida de la clave de su tipo; por ejemplo, tipo IA y tipo IIA. Los agentes de oclusión de aire contienen agentes surfactantes o tensoactivos que reducen la tensión superficial en la intracara entre aire y agua, con lo cual se forman burbujas de aire extremadamente pequeñas (90 por ciento de ellas miden menos de 100 μm) (figura 12.30). Para contar con la protección adecuada contra las heladas, los concretos con oclusión de aire deben contener entre 4 y 8 por ciento de aire, en volumen.

12.6.5 Resistencia del concreto a la compresión

El concreto, que es básicamente un material cerámico compuesto, tiene una resistencia a la compresión mucho más alta que su resistencia a la tensión. Por tanto, en proyectos de ingeniería, el concreto recibe en primer lugar cargas de compresión. La capacidad de carga de tensión del concreto se puede incrementar reforzándolo con varillas de acero. Este tema será analizado más tarde.

Como se muestra en la figura 12.29, la resistencia del concreto depende del tiempo, ya que se desarrolla por reacciones de hidratación que requieren tiempo para completarse. La resistencia del concreto a la compresión depende también en alto grado de la relación entre agua y cemento, pues las relaciones altas en agua respecto al cemento producen un concreto de menor resistencia (figura 12.31). Sin embargo, hay un límite que marca qué tan baja puede ser dicha relación, ya que al usar menos agua resulta más difícil trabajar el concreto y lograr que llene por completo los moldes. Con aire ocluido, el concreto es más fácil de trabajar y, por tanto, se puede usar una relación más baja entre el agua y el cemento.

Los especímenes para probar la resistencia del concreto a la compresión suelen ser cilindros de 6 pulg (15 cm) de diámetro y 12 pulg (30 cm) de alto. Sin embargo, partes internas u otros tipos de especímenes pueden ser recortados de las estructuras de concreto ya existentes.

12.6.6 Proporciones de las mezclas de concreto

Al diseñar mezclas de concreto se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

1. Facilidad con que podrá trabajarse el concreto. Éste debe ser capaz de fluir o de ser compactado para que adopte la forma del molde en el cual será vertido.

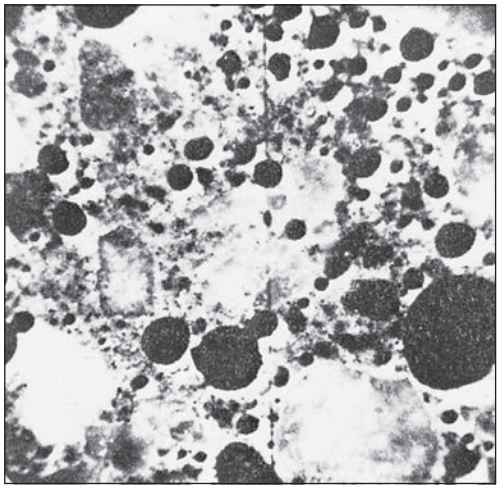


Figura 12.30
Sección pulida de concreto con aire ocluido, tal como se observa en el microscopio óptico. La mayoría de las burbujas de aire contenidas en esta muestra parecen tener un diámetro de 0.1 mm, aproximadamente.
(Según "Design and Control of Concrete Mixtures", 12a. ed., Portland Cement Association, 1979.)

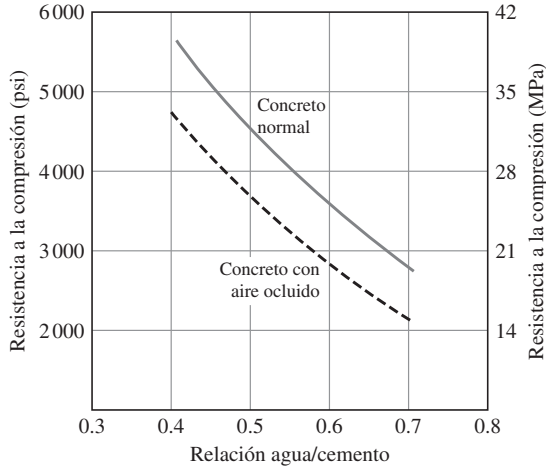


Figura 12.31
Efecto de la relación agua-cemento, en peso, sobre la resistencia a la compresión en el concreto normal y con aire ocluido.
(Según "Design and Control of Concrete Mixtures", 12a. ed., Portland Cement Association, 1979, p. 61.)

2. Resistencia y duración. Para la mayoría de las aplicaciones, el concreto debe cumplir con ciertas especificaciones de resistencia y duración.

3. Economía de producción. El costo es un factor importante en la mayoría de las aplicaciones y, por consiguiente, debe ser tomado en consideración.

Los métodos de diseño modernos que usan mezclas de concreto han evolucionado desde el primitivo método volumétrico arbitrario de principios del siglo XX que utilizaba las cifras 1:2:4 para las relaciones del cemento con respecto al agregado fino y el agregado grueso. Hoy en día, el American Concrete Institute ha establecido métodos volumétricos absolutos para calcular las mezclas de concreto normal y con oclusión de aire. En el problema de ejemplo 12.4 se esboza un método para determinar las cantidades de cemento y agua que se requieren, agregado fino y grueso, para un volumen particular de concreto, dando las relaciones de peso para los componentes, sus gravedades específicas y el volumen de agua requerido por unidad en peso de cemento.

En la figura 12.32 se muestran los rangos para las proporciones de los materiales usados en concreto por el método de valor absoluto para las mezclas de concreto normal y ligero. El concreto normal tiene un rango en volúmenes de 7 a 15 por ciento de cemento, 25 a 30 por ciento de agregado fino, 31 a 51 por ciento de agregado grueso y 16 a 21 por ciento de agua. El contenido de aire del concreto normal fluctúa entre 0.5 y 3 por ciento, pero en el caso del concreto con oclusión de aire, oscila entre 4 y 8 por ciento. Como se dijo anteriormente, la relación de agua a cemento es un factor determinante de la resistencia del concreto a la compresión. Una relación entre agua y cemento mayor que 0.4 reduce en forma notable la resistencia del concreto a la compresión (figura 12.31).

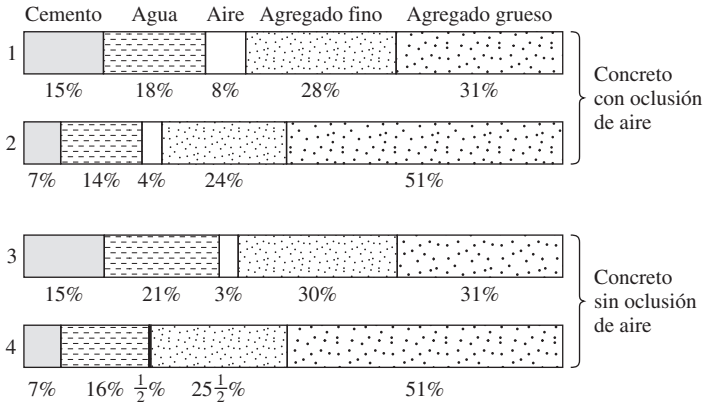


Figura 12.32
Rangos de proporciones de los componentes del concreto en volumen absoluto. Las mezclas de las barras 1 y 3 tienen contenidos más altos de agua y agregado fino, mientras que las mezclas de las barras 2 y 4 tienen menos contenido de agua y un contenido más alto de agregado grueso.
(Según "Design and Control of Concrete Mixtures", 12a. ed., Portland Cement Association, 1979, p. 7.)

PROBLEMA DE EJEMPLO 12.4

Se desea producir 75 pies cúbicos de concreto con una relación de 1:1.8:2.8 (en peso) entre cemento, arena (agregado fino) y grava (agregado grueso). ¿Cuáles son las cantidades necesarias de esos componentes si se usarán 5.5 galones de agua por cada saco de cemento? Suponga que los contenidos de humedad libre de la arena y la grava son 5 y 0.5 por ciento, respectivamente. Exprese sus respuestas en las siguientes unidades: la cantidad de cemento en sacos, la arena y la grava en libras y el agua en galones. En la siguiente tabla se presentan los datos:

Componente	Gravedad específica	Densidad de la superficie seca saturada (lb/pie^3)*
Cemento	3.15	3.15 × 62.4 lb/pie^3 = 197
Arena	2.65	2.65 × 62.4 lb/pie^3 = 165
Grava	2.65	2.65 × 62.4 lb/pie^3 = 165
Agua	1.00	1.00 × 62.4 lb/pie^3 = 62.4

**Densidad de superficie seca saturada* (DSSS) en lb/pie^3 = gravedad específica × peso de 1 pie^3 de agua = gravedad específica × 62.4 lb/pie^3. Un saco de cemento pesa 94 lb. 7.48 gal = 1 pie^3 de agua.

■ Solución

Primero se calculan los volúmenes absolutos de los componentes del concreto por saco de cemento, ya que en el problema se pide un número preciso de pies cúbicos de concreto. También se calcula primero el peso de la arena y la grava necesarias, consideradas en seco, y más tarde se hace una corrección para incluir el contenido de humedad de la arena y la grava.

Componente	Relación de pesos	Peso	DSSS (lb/pie^3)	Vol. absoluto por saco de cemento
Cemento	1	1×94 lb = 94 lb	197	94 lb/197 lb/pie^3 = 0.477 pie^3
Arena	1.8	1.8×94 lb = 169 lb	165	169 lb/165 lb/pie^3 = 1.024 pie^3
Grava	2.8	2.8×94 lb = 263 lb	165	263 lb/165 lb/pie^3 = 1.594 pie^3
Agua	(5.5 gal)			5.5 gal/7.47 gal/pie^3 = 0.735 pie^3
				Vol. abs. total por saco de cemento = 3.830 pie^3

Así, por cada saco de cemento se producen 3.830 pie^3 de concreto en seco. Sobre esta base, para producir 75 pies^3 de concreto se requieren las siguientes cantidades de cemento, arena y grava:

1. Cantidad requerida de cemento = 75 pie^3/(3.83 pie^3/saco de cemento) = 19.58 sacos ◀
2. Cantidad requerida de arena = (19.58 sacos) (94 lb/saco) (1.8) = 3 313 lb
3. Cantidad requerida de grava = (19.58 sacos) (94 lb/saco) (2.8) = 5 153 lb
4. Cantidad requerida de agua = (19.58 sacos) (5.5 gal/saco) = 107.7 gal

Sobre una base húmeda con corrección para la humedad presente en la arena y la grava,

$$\text{Agua en la arena} = (3\,313 \text{ lb})(1.05)$$
$$= 3\,479 \text{ lb}; \; 3\,479 - 3\,313 \text{ lb} = 166 \text{ lb de agua}$$
$$\text{Agua en la grava} = (5\,153 \text{ lb})(1.005)$$
$$= 5\,179 \text{ lb}; \; 5\,179 - 5\,153 \text{ lb} = 26 \text{ lb de agua}$$

1. Peso requerido de arena húmeda = 3 313 lb + 166 lb = 3 479 lb ◀
2. Peso requerido de grava húmeda = 5 153 lb + 26 lb = 5 179 lb ◀

La cantidad requerida de agua es igual a la cantidad calculada en condiciones secas, menos la cantidad de agua contenida en la arena y la grava. Así,

$$\text{Cantidad total de agua en la arena y la grava} = (166 \text{ lb} + 26 \text{ lb})\left(\frac{7.48 \text{ gal}}{\text{pie}^3}\right)\left(\frac{1 \text{ pie}^3}{62.4 \text{ lb}}\right)$$
$$= 23.0 \text{ gal}$$

De esta manera, el agua requerida en seco menos el agua contenida en la arena y la grava, equivale a la cantidad de agua requerida sobre la base húmeda:

$$107.7 \text{ gal} - 23.0 \text{ gal} = 84.7 \text{ gal} \blacktriangleleft$$

12.6.7 Concreto armado y preesforzado

En virtud de que la resistencia del concreto a la tensión es entre 10 y 15 veces menor que su resistencia a la compresión, el concreto se usa principalmente en proyectos de ingeniería donde lo primordial es la compresión. Sin embargo, cuando un miembro de concreto es sometido a fuerzas de tensión, como ocurre en una viga, el concreto se suele colar con barras de refuerzo de acero, como se muestra en la figura 12.33. En este concreto reforzado, las fuerzas de tensión son transferidas del concreto al refuerzo de acero a través de su unión. El concreto que contiene refuerzos de acero en forma de varillas, alambres, malla de alambre, etc., se conoce como **concreto armado**.

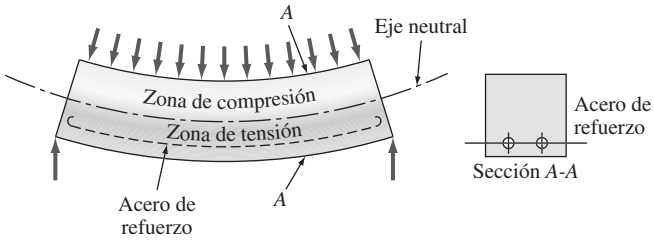


Figura 12.33
Efecto exagerado de una carga pesada sobre una viga de concreto armado. Obsérvese que las barras de acero del refuerzo se colocan en la zona de tensión para que absorban los esfuerzos de tensión.
(Según G. B. Wynne, "Reinforced Concrete Structures", Reston Publishing, 1981, p. 2.)

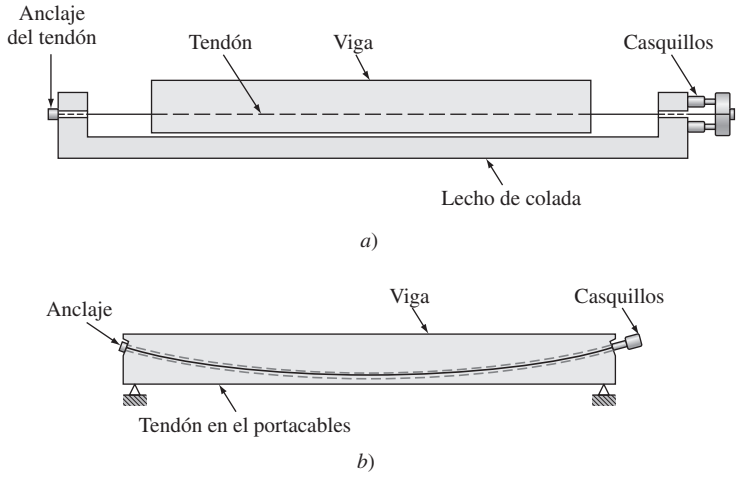


Figura 12.34
Dibujo esquemático que muestra el arreglo para producir *a*) una viga de concreto pretensado y *b*) una viga de concreto postensado.
(Según A. H. Nilson, "Design of Prestressed Concrete", Wiley, 1978, pp. 14 y 17.)

12.6.8 Concreto preesforzado

La resistencia a la tensión del concreto armado puede mejorar si se introducen tensiones de compresión en el concreto, mediante *pretensado* o *postensado*, utilizando refuerzos de acero llamados *tensores*. El tensor puede ser, por ejemplo, una varilla o cable de acero sometido a tensión. La ventaja del concreto pretensado es que las tensiones de compresión introducidas por los tensores de acero tienen que ser contrarrestadas antes que el concreto sea sometido a esfuerzos de tensión.

Concreto pretensado (preesforzado) En Estados Unidos, la mayor parte del concreto preesforzado está pretensado. En este método, los tensores, que suelen tener la forma de cables formados por múltiples alambres, se estiran entre un anclaje externo del tensor y un casquillo ajustable para aplicar la tensión (figura 12.34*a*). El concreto se vierte después sobre los tensores, que ya están en estado de tensión. Cuando el concre-

to alcanza la resistencia requerida, la presión de los casquillos se relaja. Los hilos de acero tienden a contraerse elásticamente, pero no pueden hacerlo porque están unidos al concreto. De esta manera se introducen esfuerzos de compresión en el concreto.

Concreto postensado (preesforzado) Generalmente, en este proceso se colocan en un molde del concreto (de una viga, por ejemplo), portacables huecos que contienen tensores de acero, antes de verter el concreto (figura 12.34*b*). Los tensores pueden ser de cable trenzado, haces de alambres paralelos o varillas de acero macizo. Entonces el concreto es vertido y cuando ya tiene la solidez suficiente, cada tensor es anclado en un extremo del molde de concreto y se aplica tensión por medio de casquillos en el otro extremo. Cuando la presión es suficientemente alta se usa un relleno como empaque para sustituir al casquillo, con lo cual la tensión se mantiene en el tensor. El espacio entre los tensores y el portacables suele rellenarse con lechada de cemento, la cual se introduce en forma de pasta por un extremo del portacables, bajo alta presión. La lechada mejora la capacidad de la viga de concreto para soportar esfuerzos de flexión.

12.7 ASFALTO Y MEZCLAS DE ASFALTO

El **asfalto** es un *alquitrán* que consiste básicamente en un hidrocarburo con algo de oxígeno, azufre y otras impurezas, y tiene las características mecánicas de un material polimérico termoplástico. La mayoría de los asfaltos se derivan de la refinación de petróleo, pero algunos son procesados directamente a partir de rocas que contienen alquitrán (asfalto de roca) y se extraen de depósitos a flor de tierra (asfalto lacustre). El contenido de asfalto de los petróleos crudos suele oscilar entre 10 y 60 por ciento. En Estados Unidos, casi 75 por ciento del asfalto consumido se utiliza en la pavimentación de caminos y el resto se usa principalmente en techados y construcciones.

La composición química de los asfaltos incluye entre 80 y 85 por ciento de carbono, 9 a 10 por ciento de hidrógeno, 2 a 8 por ciento de oxígeno, 0.5 a 7 por ciento de azufre y pequeñas cantidades de nitrógeno y otras trazas de metales. Los elementos constitutivos del asfalto son muy variables y complejos. Son polímeros cuyo peso molecular varía desde bajo hasta alto, y productos de condensación constituidos por cadenas de hidrocarburos, estructuras anulares y anillos condensados.

El asfalto se usa principalmente como aglutinante bituminoso con agregados para formar una **mezcla de asfalto** que, en su mayoría, se usa para pavimentar caminos. El Asphalt Institute de Estados Unidos ha designado ocho mezclas de pavimentación, basadas en la proporción de los agregados que pasan por un tamiz núm. 8.[4] Por ejemplo, una mezcla de asfalto tipo IV para pavimentar caminos tiene una composición de 3.0 a 7.0 por ciento de asfalto y de 35 a 50 por ciento del agregado que pasa a través de un tamiz núm. 8.

Las mezclas de asfalto más estables se hacen con un agregado angular densamente empacado y sólo con el asfalto necesario para recubrir las partículas del agregado. Si el contenido de asfalto es demasiado alto, éste puede concentrarse en la superficie del camino y reducir la resistencia antiderrapante cuando el clima es cálido. Los agregados angulares que no pueden pulirse con facilidad y que se traban entre sí, ofrecen mejor resistencia antiderrapante que los agregados blandos y fáciles de pulir. Además, el agregado debe adherirse bien al asfalto para evitar su separación.

[4] Un tamiz núm. 8 tiene aberturas nominales de 0.0937 pulg (2.36 mm).

12.8 MADERA

La **madera** es el material de construcción de ingeniería que se usa más ampliamente en Estados Unidos y su tonelaje de producción anual supera al de todos los demás materiales de ingeniería, incluidos el concreto y el acero (figura 1.12). Además de sus aplicaciones en la construcción de casas, edificios y puentes, la madera se usa también para fabricar materiales compuestos, tales como madera contrachapada, tablas de partículas y papel.

La madera es un material compuesto que se presenta en forma natural y consiste principalmente en un complejo arreglo de células de celulosa reforzadas con una sustancia polimérica llamada **lignina** y otros compuestos orgánicos. Al hablar de la madera en esta sección, se considerará primero su macroestructura y luego se hará un breve examen de la microestructura de las maderas blandas y duras. Por último, se mostrará la correlación entre algunas propiedades de la madera y su estructura.

12.8.1 Macroestructura de la madera

La madera es un producto natural con estructura compleja, por lo cual no se puede esperar que sea un producto homogéneo para proyectos de ingeniería, como ocurre con las barras de acero de aleación o con las partes termoplásticas moldeadas por inyección. Como se sabe, la resistencia de la madera es altamente anisotrópica, siendo su resistencia a la tensión mucho mayor en dirección paralela al tronco del árbol.

Capas en la sección transversal de un árbol Se examinará primero la sección transversal de un árbol típico, como se muestra en la figura 12.35. Las capas impor-

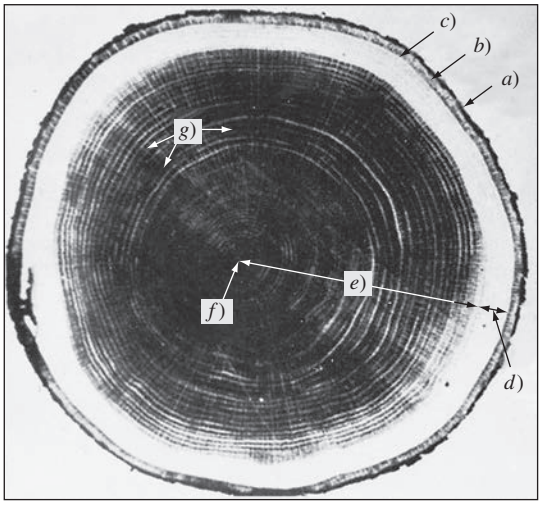


Figura 12.35
Sección transversal de un árbol típico.
a) Corteza exterior, *b*) corteza interior, *c*) capa de cámbium, *d*) duramen, *e*) albura, *f*) médula, *g*) radios de la madera.
(Según U.S. Department of Agriculture Handbook núm. 72, revisado en 1974, p. 2-2.)

tantes incluidas en esta figura están señaladas con letras, de la A a la F. El nombre y la función de cada una de estas capas se citan a continuación:

1. La capa de *corteza exterior* está formada por tejido seco muerto y le brinda protección externa al árbol.
2. La capa de *corteza interna* es húmeda y blanda, y transporta alimento a las hojas y a todas las partes del árbol que están en crecimiento.
3. La **capa de cámbium** está formada por el tejido que se encuentra entre la corteza y la madera que forma las células de madera y corteza.
4. El **duramen** es la madera de color claro que forma la parte exterior del tronco del árbol. El duramen contiene algunas células vivas cuya función es almacenar alimento y transportar savia desde las raíces hasta las hojas del árbol.
5. La **albura** es la región interior más vieja del tronco del árbol que ya no está viva. La albura suele ser más oscura que el duramen y sirve para reforzar al árbol.
6. La *médula* es el tejido blando que se encuentra en el centro del árbol en torno del cual éste empieza a crecer.

En la figura 12.35 se muestran también los radios de madera que conectan las distintas capas del árbol, desde la médula hasta la corteza, y se usan para el almacenamiento y la transferencia de alimento.

Maderas blandas y duras Los árboles se clasifican en dos grupos principales llamados **maderas blandas** (gimnospermas) y **maderas duras** (angiospermas). La base botánica de su clasificación es que si la semilla del árbol está expuesta, éste corresponde a un tipo de madera blanda y si la semilla está cubierta, el árbol es de madera dura. Con pocas excepciones, un árbol de madera blanda es el que conserva sus hojas y un árbol de madera dura es el que las pierde cada año. Los árboles de madera blanda reciben a menudo el nombre de árboles *perennes* y los de madera dura se llaman árboles *desiduos.* La mayoría de los árboles de madera blanda son físicamente blandos y la mayoría de los de madera dura son físicamente duros, pero hay excepciones. Algunos ejemplos de árboles de madera blanda nativos de Estados Unidos son el abeto, la picea, el pino y el cedro; mientras que el roble, el olmo, el arce, el abedul y el cerezo son ejemplos de árboles de madera dura.

Anillos de crecimiento anual En climas templados como el de Estados Unidos, cada estación de crecimiento anual se forma una nueva capa de madera en torno al tronco del árbol. Esas capas se llaman *anillos de crecimiento anual* y son particularmente evidentes en el corte transversal de árboles de madera blanda (figura 12.36). Cada anillo tiene dos subanillos: *madera temprana* (de primavera) y *madera tardía* (de verano). En las maderas blandas, la madera temprana tiene un color más tenue y sus células son de mayor tamaño.

Ejes de simetría de la madera Es importante saber correlacionar la dirección y la microestructura de un árbol. Para hacerlo se ha elegido una serie de ejes, como se indica en la figura 12.37. El eje paralelo al tronco del árbol se llama *eje longitudinal* (*L*), mientras que el eje perpendicular al anillo de crecimiento anual del árbol se conoce como el *eje radial* (*R*). El tercer eje, el *eje tangencial* (*T*), es paralelo al anillo anual y perpendicular tanto al eje radial como al eje longitudinal.

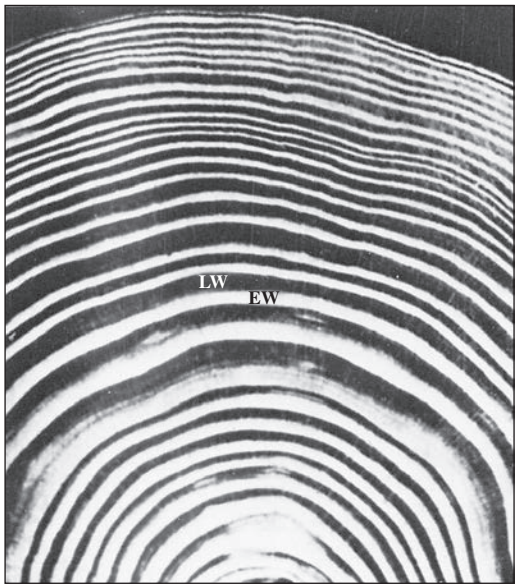


Figura 12.36
Anillos de crecimiento anual de un árbol de madera blanda. La parte del anillo anual correspondiente a la *madera de primavera* (EW) es de color más claro que la de madera tardía (LW).
[Según R.J. Thomas, J. Educ. Module Mater. Sci., **2:***56(1980). Reproducido con autorización del Journal of Materials Education, University Park, Pa.]*

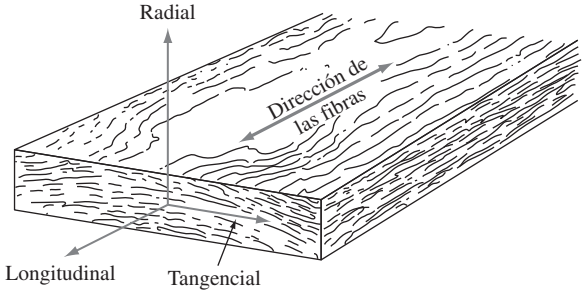


Figura 12.37
Ejes de la madera. El eje longitudinal es paralelo al grano, el eje tangencial es paralelo al anillo de crecimiento anual, y el eje radial es perpendicular al anillo de crecimiento anual.
(Según U.S. Department of Agriculture Handbook núm. 72, revisado en 1974, p. 4-2.)

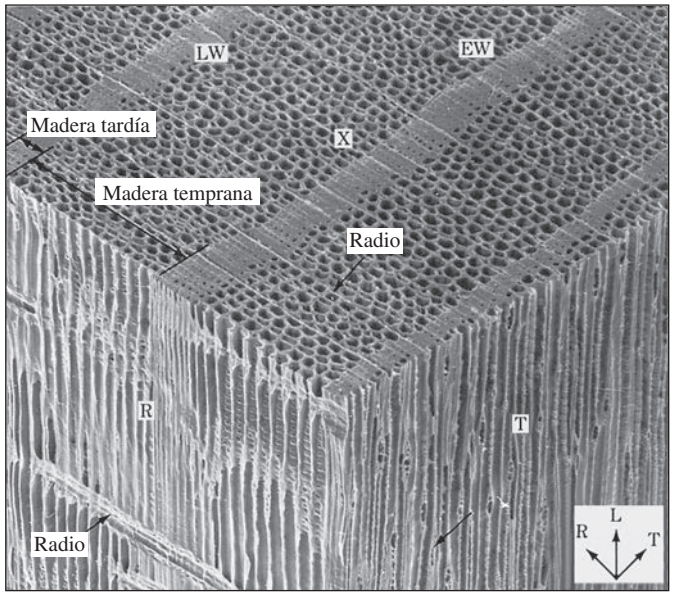


Figura 12.38
Micrografía electrónica de barrido de un bloque de madera blanda (pino de hojas largas) que muestra tres anillos de crecimiento completos en una sección transversal de su superficie. Se observa que las células individuales son más grandes en la madera de primavera que en la madera tardía. Los radios que son células para almacenar alimento se extienden perpendicularmente a la dirección longitudinal. (Amplificación 75×.)
(Cortesía del N. C. Brown Center for Ultrastructure Studies, SUNY College of Environmental Science and Forestry.)

12.8.2 Microestructura de las maderas blandas

En la figura 12.38 se muestra, a 75×, la microestructura de un pequeño bloque tomado de un árbol de madera blanda en el que pueden verse tres anillos de crecimiento completos. El mayor tamaño de las células de la madera de primavera es claramente visible en esta micrografía. La madera blanda está constituida ante todo por células tubulares largas de pared delgada llamadas **traqueidas**, que pueden observarse en la figura 12.38. El gran espacio abierto que aparece al centro de las células se llama **lumen** y se usa para la conducción de agua. La longitud de una traqueida longitudinal es de 3 a 5 mm y su diámetro es de 20 a 80 μm. Los huecos o picaduras que están en los extremos de las células permiten que el líquido fluya de una célula a otra. Las traqueidas longitudinales forman casi 90 por ciento del volumen de la madera blanda. Las células de madera de primavera tienen un diámetro relativamente grande, paredes delgadas y un lumen de gran tamaño. Las células de madera de verano tienen diámetro más pequeño y paredes gruesas, con un lumen más pequeño que las células de madera de primavera.

Los *radios de la madera* que se prolongan en dirección transversal desde la corteza hasta el centro del árbol, consisten en un conjunto de pequeñas *células de parénquima* que tienen forma de ladrillos. Las células de parénquima, que se usan para almacenar alimento, están interconectadas a lo largo de los radios mediante pares de huecos.

12.8.3 Microestructura de las maderas duras

A diferencia de las maderas blandas, las maderas duras tienen **vasos** de gran diámetro para la conducción de fluidos. Los vasos son estructuras de paredes delgadas constituidas por elementos individuales llamados *elementos del vaso* y están dispuestos en la dirección longitudinal del tallo de la hoja.

En los árboles de madera dura, ésta se clasifica como *anillo-porosa* o *difuso-porosa,* según la forma en que los vasos estén dispuestos en los anillos de crecimiento. En una madera dura de anillo-poroso los vasos formados en la madera de primavera son más grandes que los de la madera de verano (figura 12.39). En una madera porosa-difusa, los diámetros de los vasos son esencialmente iguales en todo el anillo de crecimiento (figura 12.40).

Las células longitudinales que se encargan de dar soporte al tronco de los árboles de madera dura son fibras. En estos árboles, las fibras son células alargadas con extremos puntiagudos y suelen tener paredes gruesas. La longitud de las fibras fluctúa entre 0.7 y 3 mm y su diámetro promedio es menor a unos 20 μm. El volumen leñoso de las maderas duras constituido por fibras varía considerablemente. Por ejemplo, el volumen de las fibras en el liquidámbar, que es una madera dura, es de 26 por ciento, mientras que dicho volumen en el caso del nogal americano es de 67 por ciento.

Las células que almacenan el alimento en las maderas duras son los radios (transversales) y la **parénquima**, que tienen forma de ladrillo o de caja. Los radios de las

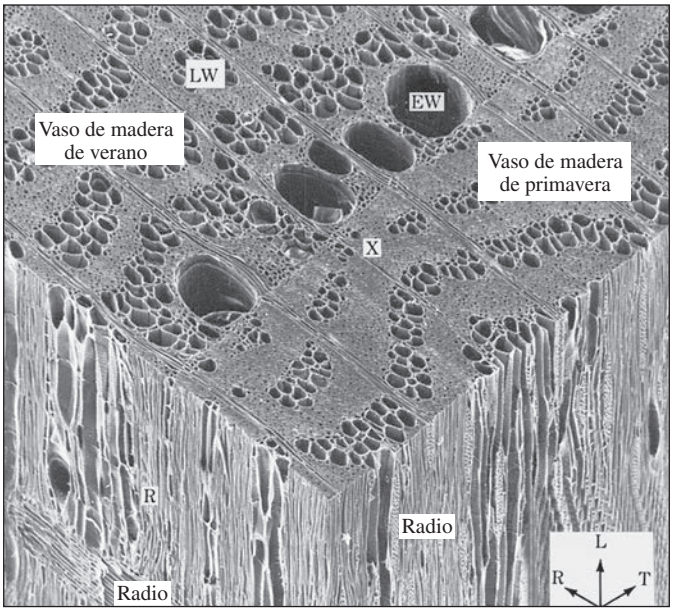


Figura 12.39
Micrografía electrónica de barrido de un bloque de madera dura (olmo americano) anillo-porosa, donde se observa el cambio abrupto del diámetro de los vasos de la madera de primavera y de la madera de verano, tal como se observan en la superficie de la sección transversal. (Amplificación 54×.)
(Cortesía del N. C. Brown Center for Ultrastructure Studies, SUNY College of Environmental Science and Forestry.)

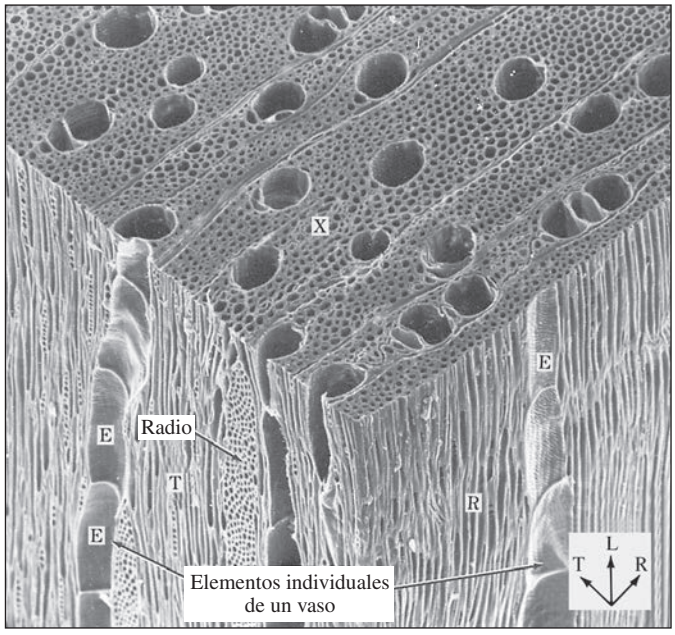


Figura 12.40
Micrografía electrónica de barrido de un bloque de madera dura (arce de azúcar) difuso-porosa, mostrando el diámetro bastante uniforme de los vasos en todo el anillo de crecimiento. La formación del vaso a partir de elementos individuales puede verse claramente. (Amplificación 100×.)
(Cortesía del N. C. Brown Center for Ultrastructure Studies, SUNY College of Environmental Science and Forestry.)

maderas duras suelen ser mucho más grandes que los de las maderas blandas y tienen muchas células en toda su anchura.

12.8.4 Ultraestructura de la pared celular

Ahora se examinará la estructura de una célula de madera usando gran amplificación, como la que se muestra en corte telescópico en la figura 12.41. La pared celular inicial que se forma en la división celular durante el periodo de crecimiento se llama *pared primaria.* Durante su crecimiento, la pared primaria se desarrolla en dirección transversal y también longitudinal, y una vez que alcanza todo su tamaño, se forma la *pared secundaria* en capas concéntricas que crecen hacia el interior del centro de la célula (figura 12.41).

Los principales componentes de la célula de madera son *celulosa, hemicelulosa* y *lignina.* Las moléculas cristalinas de celulosa constituyen entre 45 y 50 por ciento del material sólido de la madera. La celulosa es un polímero lineal formado por unidades de glucosa (figura 12.42) con un grado de polimerización que fluctúa entre 5 000 y 10 000. Las ligaduras covalentes, dentro de las unidades de glucosa y entre ellas mismas, crean una molécula recta y rígida con alta resistencia a la tensión. Los enlaces laterales entre las moléculas de celulosa se deben a los puentes de hidrógeno y a los momentos bipolares permanentes. La hemicelulosa constituye hasta 20 o 25 por ciento, en peso, del material sólido de las células de madera y es una molécula amorfa rami-

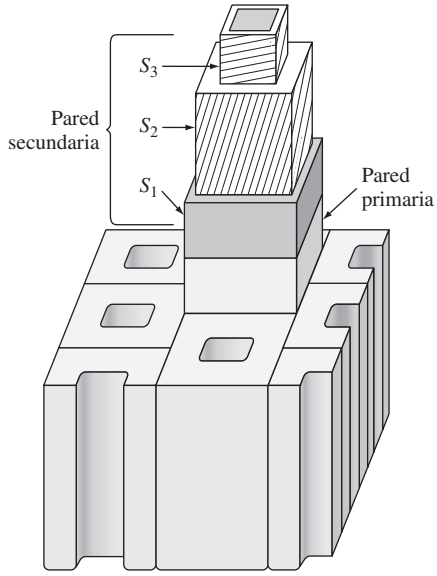


Figura 12.41
Dibujo esquemático de una célula de madera, en corte telescópico, perteneciente a una estructura celular múltiple donde se muestra el grosor relativo de las paredes primaria y secundaria de una célula de madera. Las líneas dibujadas en las paredes primaria y secundaria indican las orientaciones de las microfibrillas.
[Según R. J. Thomas, J. Educ. Module Mater, Sci. **2:***85(1980). Reproducido con autorización del Journal of Materials Education, University Park, Pa.]*

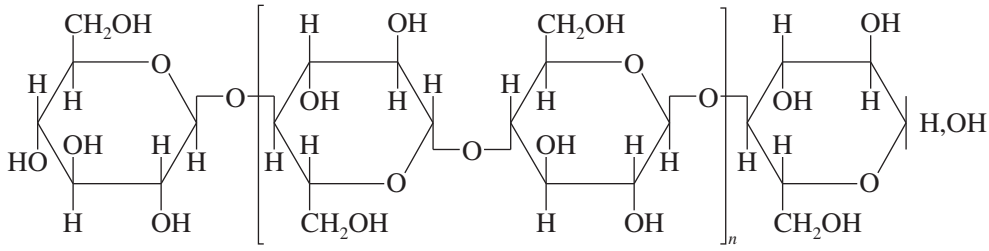


Figura 12.42
Estructura de una molécula de celulosa.
(Según J. D. Wellons, "Adhesive Bonding of Woods and Other Structural Materials", University Park, Pa., Materials Education Council, 1983.)

ficada que contiene unidades de azúcar de varios tipos. Las moléculas de hemicelulosa tienen un grado de polimerización de 150 a 200. El tercer componente principal de las células de madera es la lignina, que constituye entre 20 y 30 por ciento, en peso, del material sólido. Las ligninas son materiales poliméricos tridimensionales muy complejos, con enlaces cruzados, y están formadas por unidades fenólicas.

La pared de la célula se compone principalmente de **microfibrillas** unidas entre sí por un adhesivo de lignina. Se cree que las microfibrillas consisten en un núcleo cristalino de celulosa rodeado de una región amorfa de hemicelulosa y lignina. La disposición y la orientación de las microfibrillas varían en las distintas capas de la pared celular, como se observa en la figura 12.41. Las ligninas imparten rigidez a la pared celular y le permiten resistir fuerzas de compresión. Además de los materiales sólidos, las células de madera pueden absorber agua en proporción de hasta 30 por ciento de su peso aproximadamente.

12.8.5 Propiedades de la madera

Contenido de humedad La madera contiene algo de humedad, a menos que sea secada en un horno hasta un peso constante. El agua se presenta en la madera que es absorbida por las paredes fibrosas de las células o como agua no ligada en el lumen de la fibra celular. Convencionalmente, el porcentaje de agua contenido en la madera se define mediante la siguiente ecuación

$$\text{Contenido de humedad en la madera (\% en peso)} = \frac{\text{peso de agua en la muestra}}{\text{peso de la muestra de madera seca}} \times 100\% \quad \textbf{(12.18)}$$

En virtud de que el porcentaje de agua se calcula sobre una base seca, el contenido de humedad de la madera puede ser superior a 200 por ciento.

PROBLEMA DE EJEMPLO 12.5

Un trozo de madera que contiene humedad pesa 165.3 g, y después de ser secado en el horno hasta un peso constante, pesa 147.5 g. ¿Cuál es el porcentaje de su contenido de humedad?

■ Solución

El peso del agua contenida en la muestra de madera es igual al peso de la muestra de madera húmeda menos el peso de ésta después de ser secada en un horno hasta un peso constante. Por tanto,

$$\text{\% del contenido de humedad} = \frac{\text{peso de la madera húmeda} - \text{peso de la madera seca}}{\text{peso de la madera seca}} \times 100\% \quad \textbf{(12.18)}$$

$$= \frac{165.3\text{ g} - 147.5\text{ g}}{147.5\text{ g}} \times 100\% = 12.1\% \blacktriangleleft$$

El estado húmedo de la madera en el árbol vivo se conoce como la *condición verde*. El contenido de humedad promedio del duramen de las maderas blandas en condición verde es de 150 por ciento aproximadamente, mientras que el de la albura de la misma especie es de casi 60 por ciento. En las maderas duras, la diferencia del contenido de humedad en condición verde entre el duramen y la albura suele ser mucho menor, pues ambos promedian cerca de 80 por ciento.

Resistencia mecánica En la tabla 12.6 se da una lista de algunas propiedades mecánicas típicas de ciertos tipos de maderas cultivadas en Estados Unidos. En gene-

Tabla 12.6 Propiedades mecánicas típicas de algunas maderas comercialmente importantes cultivadas en Estados Unidos

Especie	Condición	Gravedad específica	Flexión estática: Módulo de ruptura (psi)*	Flexión estática: Módulo de elasticidad (10^6 psi)*	Compresión paralela al grano; máxima resistencia al aplastamiento (psi)*	Compresión perpendicular al grano; resistencia de la fibra en el límite prop. (psi)*	Corte paralelo al grano; máxima resistencia al corte (psi)*
Maderas duras:							
Olmo americano	Verde	0.46	7 200	1.11	2 910	360	1 000
	Secado al horno†	0.50	11 800	1.34	5 520	690	1 510
Nogal americano, pacana	Verde	0.60	9 800	1.37	3 990	780	1 480
	Secado al horno†	0.66	13 700	1.73	7 850	1 720	2 080
Arce rojo	Verde	0.49	7 700	1.39	3 280	400	1 150
	Secado al horno†	0.54	13 400	1.64	6 540	1 000	1 850
Roble blanco	Green	0.60	8 300	1.25	3 560	670	1 250
	Secado al horno†	0.68	15 200	1.78	7 440	1 070	2 000
Maderas blandas:							
Abeto Douglas de la costa	Verde	0.45	7 700	1.56	3 780	380	900
	Secado al horno†	0.48	12 400	1.95	7 240	800	1 130
Cedro rojo del oeste	Green	0.31	5 200	0.94	2 770	240	770
	Secado al horno†	0.32	7 500	1.11	4 560	460	990
Pino blanco del este	Verde	0.34	4 900	0.99	2 440	220	680
	Secado al horno†	0.35	8 600	1.24	4 800	440	900
Secoya, crecimiento joven	Verde	0.34	5 900	0.96	3 110	270	890
	Secado al horno†	0.35	7 900	1.10	5 220	520	1 110

*Para obtener MPa, psi se multiplica por 6.89×10^{-3}.
†Secado al horno hasta 12 por ciento de humedad.
Fuente: *The Encyclopedia of Wood*, Sterling Publishing Co., 1980, pp. 68-75.

ral, las maderas que botánicamente se clasifican como blandas son físicamente suaves y las que se clasifican como maderas duras son físicamente duras, aunque hay excepciones. Por ejemplo, la madera de balsa, que es muy blanda físicamente, se clasifica en botánica como madera dura.

La resistencia a la compresión de la madera en la dirección paralela al grano es considerablemente más alta que la de la madera perpendicular al grano, por un factor de 10, aproximadamente. Por ejemplo, la resistencia a la compresión del pino blando del este secado al horno (12 por ciento de contenido de humedad) es 4 800 psi (33 MPa) en la dirección paralela al grano, pero de sólo 440 psi (3.0 MPa) en la dirección perpendicular al grano. La causa de esta diferencia es que la resistencia de la madera en dirección longitudinal se debe en primer término a los enlaces covalentes fuertes de las microfibrillas de celulosa cuya orientación principal es longitudinal (figura 12.42). La resistencia de la madera en dirección perpendicular al grano es mucho más baja porque depende de la resistencia de los puentes de hidrógeno más débiles que unen lateralmente a las moléculas de celulosa.

Como se observa en la tabla 12.6, la madera en condición verde es más débil que cuando ha sido secada al horno. La causa de esta diferencia es que la eliminación del agua de las regiones menos ordenadas de la celulosa de las microfibrillas permite que la estructura molecular de la célula se compacte y forme puentes de hidrógeno internos. Así, al perder humedad, la madera se contrae y se vuelve más densa y resistente.

Contracción La madera verde se contrae a medida que su contenido de humedad disminuye y provoca un pandeo en la madera, como se ilustra en la figura 12.43, en las direcciones radial y tangencial de la sección transversal de un árbol. La madera se contrae mucho más en dirección transversal que en la longitudinal, pues la con-

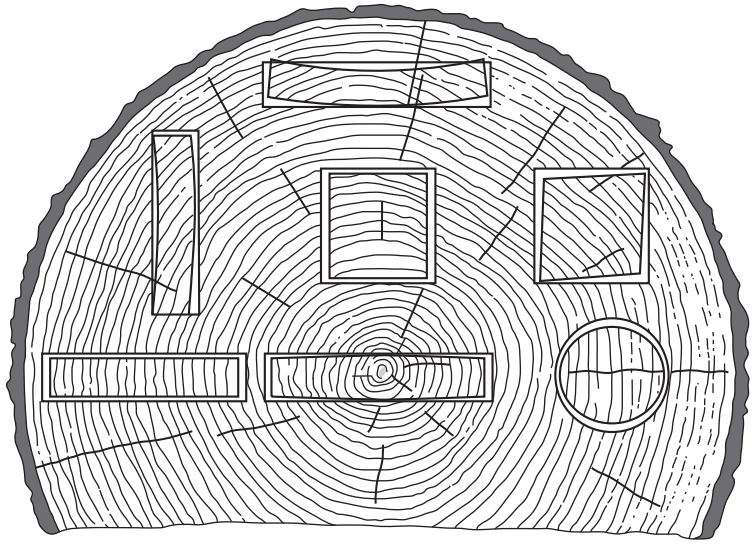


Figura 12.43
Contracción y distorsión de la sección de un árbol en dirección tangencial, radial y del anillo anual.
[Según R. T. Hoyle, J. of Educ. Module Mater. Sci., **4:***88(1982). Reproducido con autorización del Journal of Materials Education, University Park, Pa.]*

tracción transversal oscila de ordinario entre 10 y 15 por ciento, mientras que en dirección longitudinal es de sólo 0.1 por ciento, aproximadamente.

Cuando el agua es eliminada de las regiones amorfas de la parte exterior de las microfibrillas, éstas se acercan más entre sí y la madera se vuelve más densa. Debido a que la dimensión larga de las microfibrillas se orienta principalmente en dirección longitudinal al tronco del árbol, la mayor parte de la contracción se produce en dirección transversal.

12.9 ESTRUCTURAS MULTICAPAS

Los materiales compuestos que se fabrican intercalando un material entre dos capas externas delgadas se usan comúnmente en diseños de ingeniería. Dos tipos de estos materiales son 1) estructura tipo sándwich con panal y 2) estructura tipo sándwich con recubrimiento.

12.9.1 Estructura tipo sándwich con panal

La estructura tipo sándwich con panal se ha usado como material de construcción en la industria aeroespacial por más de 30 años. En la mayoría de los aviones que vuelan hoy se utiliza este material de construcción. La mayor parte del panal que hoy se usa está fabricado con aleaciones de aluminio como la 5052 y la 2024 o con materiales fenólicos reforzados con vidrio, poliéster reforzado con vidrio y otros materiales reforzados con fibra de aramida.

Los paneles de aluminio tipo panal se fabrican uniendo con un material adhesivo láminas de aleación de aluminio y secciones centrales tipo panal, también de aleación de aluminio, como se muestra en la figura 12.44. Este tipo de construcción produce un panel de sándwich duro, rígido, resistente y liviano.

12.9.2 Estructuras metálicas recubiertas

La estructura con recubrimiento se usa para producir materiales compuestos a partir de una capa central de metal con capas delgadas externas de otro metal o metales (fi-

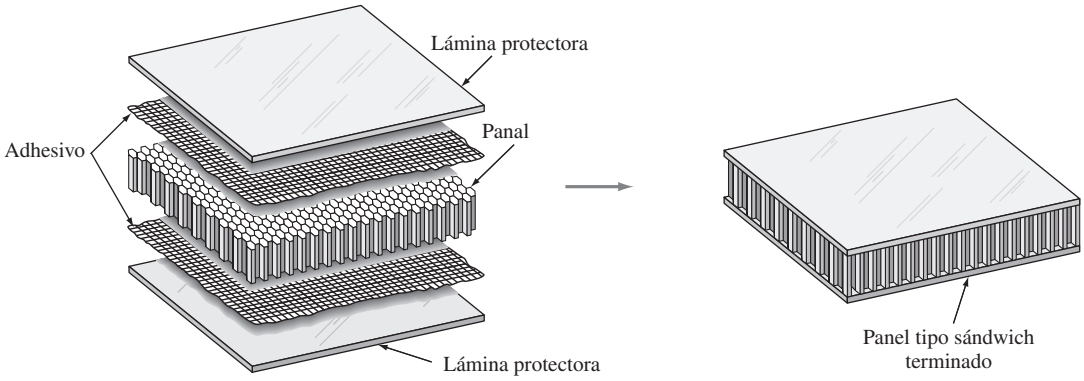


Figura 12.44
Panel tipo sándwich fabricado uniendo tapas de aluminio con una capa central tipo panal, de aleación de aluminio.
(Cortesía de la Hexcel Co.)

Figura 12.45
Sección transversal de una estructura metálica recubierta.

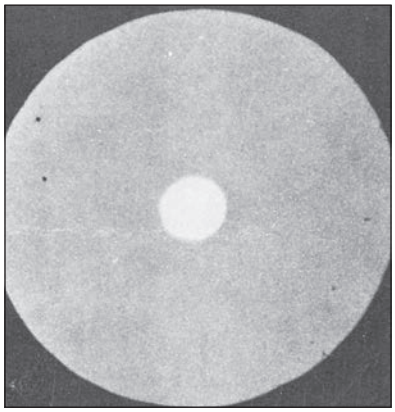
gura 12.45). De ordinario, las capas delgadas externas de metal se adhieren por laminado en caliente al metal interior del núcleo para formar uniones metalúrgicas (por difusión atómica) entre las capas exteriores y el metal de la parte interna. Este tipo de material compuesto tiene muchas aplicaciones en la industria; por ejemplo, las aleaciones de aluminio de alta resistencia, como la 2024 y la 7075, tienen una resistencia a la corrosión relativamente pobre y pueden ser protegidas con una delgada capa de recubrimiento de aluminio blanda muy resistente a la corrosión. Otra aplicación de los metales recubiertos es el uso de metales relativamente caros para proteger al metal menos costoso. Por ejemplo, las monedas de 10¢ y 25¢ estadounidenses tienen una capa de aleación Cu-25% Ni sobre el cobre que es menos caro.

12.10 COMPUESTOS CON MATRIZ DE METAL Y MATRIZ DE CERÁMICA

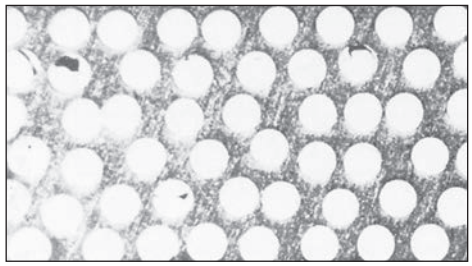
12.10.1 Compuestos con matriz de metal (CMM)

Los materiales compuestos con matriz de metal han sido tan investigados en los últimos años que ahora se han producido muchos materiales nuevos altamente resistentes para su peso. La mayoría de esos materiales han sido desarrollados para la industria aeroespacial, pero algunos se usan en otras aplicaciones, como motores de automóvil. En general, en función del refuerzo, los tres principales tipos de CMM son los reforzados con fibra continua, con fibra discontinua y con partículas de un material.

MMC reforzados con fibra continua Los filamentos continuos constituyen el mayor perfeccionamiento en la rigidez (módulo de tensión) y resistencia de los CMM. Uno de los primeros CMM de fibra continua que se desarrollaron fue el sistema integrado por una matriz de aleación de aluminio reforzada con fibras de boro. La fibra de boro de este compuesto se fabrica depositando químicamente vapor de boro en un sustrato de alambre de tungsteno (figura 12.46*a*). El compuesto Al-B se fabrica presionando en caliente capas de fibras de B entre hojas de aluminio, de manera que éstas se deformen alrededor de las fibras y se unan entre sí. En la figura 12.46*b* se muestra una sección transversal de un compuesto con matriz de aleación de aluminio reforzada con fibra continua de B. En la tabla 12.7 se da una lista de algunas propiedades mecánicas de varios compuestos a base de aleaciones de aluminio reforzadas con fibras de B. Al añadir 51% en volumen de B, la resistencia a la tensión axial de la aleación de aluminio 6061 aumentó de 310 a 1 417 MPa, mientras que su módulo de tensión se incrementó de 69 a 231 GPa. Entre las aplicaciones de los compuestos de Al-B figuran algunos miembros estructurales de la parte media del fuselaje de un trasbordador espacial orbital.



a)



b)

Figura 12.46
a) Filamento de boro de 100 μm de diámetro rodeando a un núcleo de alambre de tungsteno de 12.5 μm de diámetro. *b*) Micrografía de la sección transversal de un compuesto hecho de una aleación de aluminio y boro (amplificación 40×.)
(Según "Engineered Materials Handbook", vol. 1, ASM International, 1987, p. 852.)

Tabla 12.7 Propiedades mecánicas de materiales compuestos con matriz de metal

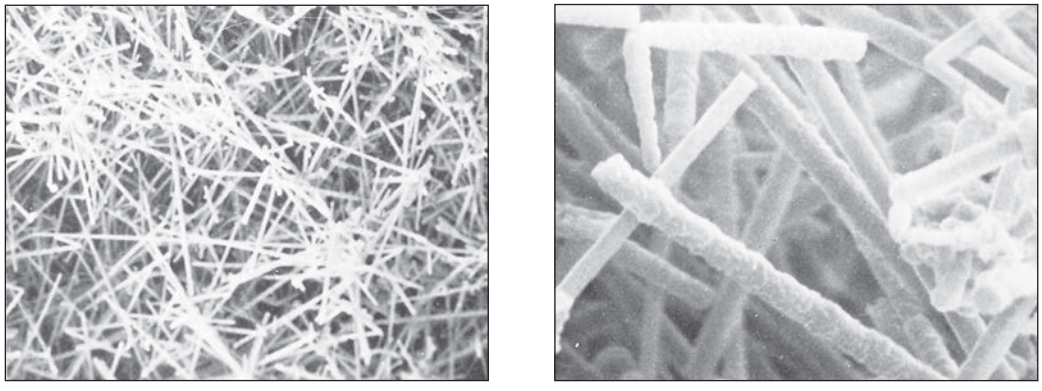
	Resistencia a la tensión		Módulo elástico		Deformación al momento de fallar (%)
	MPa	ksi	GPa	Msi	
CMM de fibra continua:					
Al 2024-T6 (45% B) (axial)	1 458	211	220	32	0.810
Al 6061-T6 (51% B) (axial)	1 417	205	231	33.6	0.735
Al 6061-T6 (47% SiC) (axial)	1 462	212	204	29.6	0.89
CMM de fibra discontinua:					
Al 2124-T6 (20% SiC)	650	94	127	18.4	2.4
Al 6061-T6 (20% SiC)	480	70	115	17.7	5
CMM con partículas:					
Al 2124 (20% SiC)	552	80	103	15	7.0
Al 6061 (20% SiC)	496	72	103	15	5.5
Sin refuerzo:					
Al 2124-F	455	66	71	10.3	9
Al 6061-F	310	45	68.9	10	12

Otros refuerzos de fibra continua que se han usado en los CMM son las fibras de carburo de silicio, grafito, alúmina y tungsteno. Un compuesto de Al 6001 reforzado con fibras continuas de SiC está siendo evaluado para utilizarlo en la sección vertical de la cola de un avión de combate avanzado. Reviste especial interés el uso proyectado de los refuerzos de fibra continua de SiC en una matriz de aluminuro de titanio en una aeronave hipersónica como el avión de National Aerospace (figura 1.1).

CMM reforzados con fibra discontinua y con partículas Se han producido muchos tipos de CMM reforzados con fibras discontinuas y con partículas. En la ingeniería, estos materiales tienen las ventajas de mayor resistencia, más rigidez y mejor estabilidad dimensional que las aleaciones metálicas no reforzadas. En este breve análisis de los CMM se pondrá especial atención en los compuestos de las aleaciones de aluminio.

Los *CMM reforzados con partículas* son CMM de aleaciones de aluminio de bajo costo, fabricados utilizando partículas de forma irregular de alúmina y carburo de silicio con diámetros que fluctúan entre 3 y 200 μm. Las partículas, que a veces se tratan con recubrimiento secreto, pueden mezclarse con la aleación de aluminio derretida y moldearse en lingotes o palanquillas de extrusión para su procesado futuro. En la tabla 12.7 se muestra que la resistencia final a la tensión de la aleación de Al 6061 puede aumentar de 310 a 496 MPa con la adición de 20 por ciento de SiC, mientras que el módulo de tensión puede incrementarse de 69 a 103 GPa. Entre las aplicaciones de este material figuran equipos deportivos y partes de motores de automóvil.

Los *MMC reforzados con fibra discontinua* se producen principalmente mediante procesos de metalurgia en polvo e infiltración del material fundido. En el proceso de metalurgia en polvo, filamentos finos de carburo de silicio similares a agujas de 1 a 3 μm de diámetro y de 50 a 200 μm de largo (figura 12.47), se mezclan con metal pulverizado, la mezcla se consolida a presión en caliente y luego es extruida o forjada según el perfil deseado. En la tabla 12.7 se muestra que la resistencia a la ruptura por tensión de la aleación de Al 6001 puede aumentar de 310 a 480 MPa con la adición de 20% de filamentos finos de SiC, mientras que el módulo de tensión puede elevarse de 69 a 115 GPa. Aun cuando se pueden conseguir mayores incrementos de resistencia y rigidez con la adición de filamentos finos, que con partículas de material, la metalurgia en polvo y los procesos de infiltración del fundido son más costosos. Algunas aplicaciones de los CMM de aleación de aluminio reforzado con fibras discontinuas son: partes del sistema de guía para proyectiles y pistones de alto rendimiento para automóvil.



a) *b*)

Figura 12.47
Micrografía de filamentos finos de carburo de silicio de un solo cristal que se usan para reforzar compuestos con matriz metálica. Los filamentos tienen un diámetro de 1 a 3 μm y de 50 a 200 μm de longitud.
(Cortesía de American Matrix Corp.)

PROBLEMA DE EJEMPLO 12.6

Un material compuesto con matriz de metal se fabrica con una aleación de aluminio reforzada con fibra y boro (B) (figura EP12.6). Para formar la fibra de boro, un alambre de tungsteno (W) (r = 10 μm) se recubre de boro, con lo cual adquiere un radio final de 75 μm. A continuación, la aleación de aluminio se une alrededor de las fibras de boro, aportando una fracción volumétrica de 0.65 a dicha aleación. Suponiendo que la regla de las mezclas binarias (ecuación 12.7) sea aplicable también a mezclas ternarias, calcule el módulo de tensión efectivo del material compuesto en condiciones de isodeformación. Datos: E_W = 410 GPa; E_B = 379 GPa; E_{A1} = 68.9 GPa.

■ Solución

$$E_{\text{comp}} = f_{\text{W}}E_{\text{W}} + f_{\text{B}}E_{\text{B}} + f_{\text{Al}}E_{\text{Al}} \qquad f_{\text{W+B}} = 0.35$$

$$f_{\text{W}} = \frac{\text{área del alambre W}}{\text{área de la fibra B}} \times f_{\text{W + B}}$$

$$f_{\text{W}} = \frac{\pi(10\ \mu\text{m})^2}{\pi(75\ \mu\text{m})^2} \times 0.35 = 6.22 \times 10^{-3} \qquad f_{\text{Al}} = 0.65$$

$$f_{\text{B}} = \frac{\text{área de la fibra B} - \text{área del alambre W}}{\text{área de la fibra B}} \times f_{\text{W + B}}$$

$$= \frac{\pi(75\ \mu\text{m})^2 - \pi(10\ \mu\text{m})^2}{\pi(75\ \mu\text{m})^2} \times 0.35 = 0.344$$

$$\begin{aligned} E_{\text{comp}} &= f_{\text{W}}E_{\text{W}} + f_{\text{B}}E_{\text{B}} + f_{\text{Al}}E_{\text{Al}} \\ &= (6.22 \times 10^{-3})(410\ \text{GPa}) + (0.344)(379\ \text{GPa}) + (0.65)(68.9\ \text{GPa}) \\ &= 178\ \text{GPa} \blacktriangleleft \end{aligned}$$

Obsérvese que el módulo de tensión (rigidez) del material compuesto es más o menos 2.5 veces el de la aleación de aluminio no reforzada.

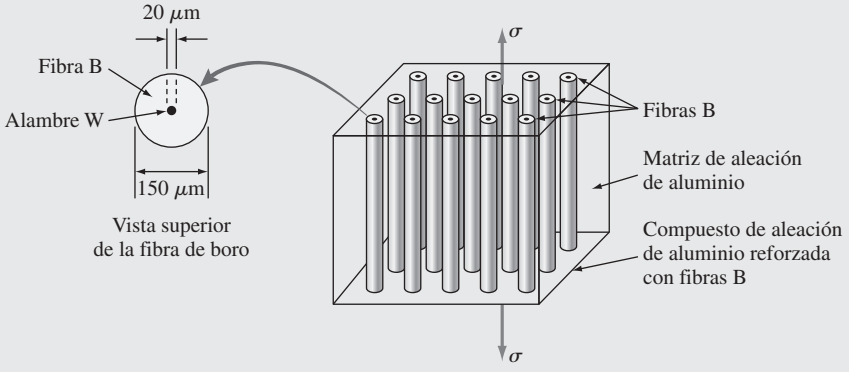


Figura EP12.6

PROBLEMA DE EJEMPLO 12.7

Un material compuesto con matriz metálica está hecho con 80 por ciento, en volumen, de la aleación de aluminio 2124-T6 y 20 por ciento, en volumen, de fibras finas de SiC. La densidad de la aleación 2124-T6 es 2.77 g/cm^3 y la de las fibras es 3.10 g/cm^3. Calcule la densidad promedio del material compuesto.

■ Solución

La base es 1 m^3 de material; así, se tienen 0.80 m^3 de aleación 2124 y 0.20 m^3 de fibra de SiC en 1 m^3 de material.

$$\text{Masa de aleación 2124 en 1 m}^3 = (0.80\ \text{m}^3)(2.77\ \text{Mg/m}^3) = 2.22\ \text{Mg}$$

$$\text{Masa de fibrillas de SiC en 1 m}^3 = (0.20\ \text{m}^3)(3.10\ \text{Mg/m}^3) = \underline{0.62\ \text{Mg}}$$

$$\text{Masa total en 1 m}^3 \text{ de compuesto} = 2.84\ \text{Mg}$$

$$\text{Densidad promedio} = \frac{\text{masa}}{\text{vol. unitario}} = \frac{\text{masa total de material en 1 m}^3}{1\ \text{m}^3} = 2.84\ \text{Mg/m}^3 \blacktriangleleft$$

12.10.2 Compuestos con matriz de cerámica (CMC)

Recientemente se han desarrollado materiales compuestos con matriz de cerámica que tienen propiedades mecánicas mejoradas, por lo cual su resistencia y dureza son superiores a las de la matriz de cerámica no reforzada. Una vez más, los tres principales tipos de estos compuestos en función del refuerzo son: con fibra continua, con fibra discontinua y con partículas.

CMC reforzados con fibra continua Dos tipos de fibras continuas que se han usado en los CMC son el carburo de silicio y el óxido de aluminio. En el proceso de fabricar un material compuesto con matriz de cerámica, las fibras de SiC se entretejen en forma de felpa y luego se deposita un vapor químico para que el SiC quede impregnado dentro de la felpa de fibras. En otro proceso, las fibras de SiC se encapsulan dentro de un material de cerámica vítrea (véase el problema de ejemplo 12.8). Algunas aplicaciones de estos materiales son tubos de intercambiador de calor, sistemas de protección térmica y materiales para ambientes expuestos a la erosión corrosiva.

CMC con refuerzo discontinuo (filamentos finos) y con partículas Los filamentos finos de cerámica (figura 12.47) pueden incrementar de modo considerable la resistencia a la fractura de cerámicas monolíticas (tabla 12.8). La adición de 20% en volumen de filamentos de SiC a la alúmina puede aumentar la resistencia a la fractura de la cerámica de alúmina de 4.5 a 8.5 MPa $\sqrt{\text{m}}$. Los materiales con matriz de cerámica reforzados con fibras cortas y con partículas tienen la ventaja de que pueden ser trabajados mediante procesos comunes de cerámica, como el prensado isostático en caliente (*PIC*).

Se cree que los materiales compuestos con matriz de cerámica pueden endurecerse por tres mecanismos principales; este efecto es resultado de las fibras de refuerzo que interfieren con la propagación de grietas en la cerámica. Esos mecanismos son:

1. *Deflexión de las grietas.* Cuando la grieta llega al refuerzo, se desvía y eso hace que su ruta de propagación sea más sinuosa. Así pues, se requieren esfuerzos mayores para propagar la grieta.

2. *Puenteo de las grietas.* Las fibras o filamentos pueden actuar como puentes tendidos sobre la grieta, con lo cual ayudan a mantener unido el material y hacen que se requieran niveles de esfuerzos más altos para que el agrietamiento prosiga (figura 12.48).

Tabla 12.8 Propiedades mecánicas de materiales compuestos con matriz de cerámica reforzada con filamentos de SiC a temperatura ambiente

Matriz	Contenido de filamentos de SiC (% en vol.)	Resistencia a la flexión		Resistencia a la fractura	
		MPa	ksi	MPa$\sqrt{\text{m}}$	ksi$\sqrt{\text{pulg}}$
Si_3N_4	0	400-650	60-95	5-7	4.6-6.4
	10	400-500	60-75	6.5-9.5	5.9-8.6
	30	350-450	50-65	7.5-10	6.8-9.1
Al_2O_3	0	…	…	4.5	4.1
	10	400-510	57-73	7.1	6.5
	20	520-790	75-115	7.5-9.0	6.8-8.2

Fuente: "Engineered Materials Handbook", vol. 1, Composites, ASM International, 1987, p. 942.

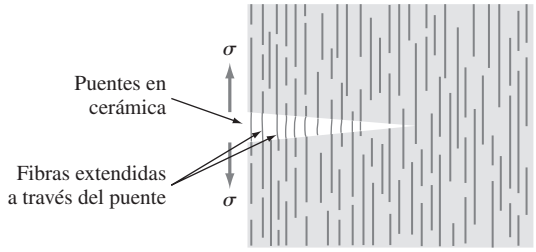


Figura 12.48
Diagrama esquemático que muestra cómo las fibras de refuerzo pueden inhibir la propagación de grietas en materiales con matriz de cerámica formando puentes sobre ellas, al tiempo que absorben energía al ser arrancadas.

3. *Separación violenta de las fibras.* La fricción ocasionada por las fibras o los filamentos al ser arrancados de la matriz que se agrieta, absorbe energía, por lo cual se requieren esfuerzos más altos para producir mayor agrietamiento. Por tanto, para lograr re-

PROBLEMA DE EJEMPLO 12.8

Un compuesto con matriz de cerámica está hecho con fibras continuas de SiC incrustadas en dicha matriz (figura EP12.8). *a*) Calcule el módulo elástico a la tensión del compuesto en condiciones de isodeformación y *b*) calcule el esfuerzo σ a la cual las grietas empiezan a crecer. Los datos son los siguientes:

Matriz de vidrio-cerámica:
$E = 94$ GPa
$K_{IC} = 2.4$ MPa $\sqrt{\text{m}}$
La mayor falla preexistente tiene 10 μm de diámetro

Fibras de SiC:
$E = 350$ GPa
$K_{IC} = 4.8$ MPa $\sqrt{\text{m}}$
Las mayores melladuras superficiales tienen 5 μm de profundidad

■ Solución

a) Cálculo de E para el compuesto. Suponiendo que la ecuación 12.7 para las condiciones de isodeformación sea válida,

$$E_{comp} = f_{GC}E_{GC} + f_{SiC}E_{SiC}$$

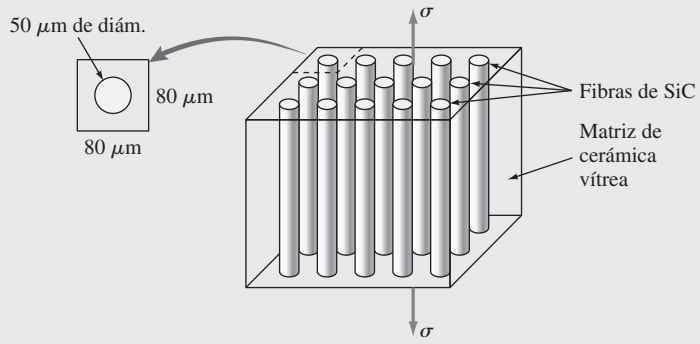


Figura EP12.8

Puesto que la longitud de las fibras es la misma, se puede hallar la fracción en volumen de las fibras SiC calculando la fracción del área que ocupan dichas fibras sobre la superficie en los extremos de las mismas. Según se ve en la figura EP12.8, cada fibra de 50 μm de diámetro está encerrada en un área de 80 μm $\times$ 80 μm. Así,

$$f_{\text{SiC}} = \frac{\text{área de la fibra}}{\text{áreal total seleccionada}} = \frac{\pi(25\ \mu\text{m})^2}{(80\ \mu\text{m})(80\ \mu\text{m})} = 0.307$$

$$f_{\text{GC}} = 1 - 0.307 = 0.693$$

$$E_{\text{comp}} = (0.693)(94\ \text{GPa}) + (0.307)(350\ \text{GPa}) = 172\ \text{GPa} \blacktriangleleft$$

b) Esfuerzo cual las grietas empiezan a formarse en el compuesto. En condiciones de isodeformación, $\epsilon_{\text{comp}} = \epsilon_{\text{GC}} = \epsilon_{\text{SiC}}$. Como $\sigma = E\epsilon$ y $\epsilon = \sigma/E$,

$$\frac{\sigma_{\text{comp}}}{E_{\text{comp}}} = \frac{\sigma_{\text{GC}}}{E_{\text{GC}}} = \frac{\sigma_{\text{SiC}}}{E_{\text{SiC}}}$$

La fractura empieza en un componente dado cuando $\sigma = K_{\text{IC}}/\sqrt{\pi a}$ (ecuación 11.4), suponiendo que $Y = 1$. Se calculará el esfuerzo mínimo que provoca la formación de agrietamientos en ambos materiales y luego se compararán los resultados. El componente que se agriete con el menor esfuerzo determinará el valor del esfuerzo en el cual el compuesto empieza a agrietarse.

i) Cerámica vítrea. Para este material, la falla preexistente más grande tiene 10 μm de diámetro. Este valor es de $2a$ para la ecuación 11.4 y, por tanto, $a = 10\ \mu\text{m}/2$ o $a = 5\ \mu\text{m}$.

$$\frac{\sigma_{\text{comp}}}{E_{\text{comp}}} = \frac{\sigma_{\text{GC}}}{E_{\text{GC}}} = \left(\frac{K_{\text{IC,GC}}}{\sqrt{\pi a}}\right)\left(\frac{1}{E_{\text{GC}}}\right)$$

$$\sigma_{\text{comp}} = \left(\frac{E_{\text{comp}}}{E_{\text{GC}}}\right)\left(\frac{K_{\text{IC,GC}}}{\sqrt{\pi a}}\right) = \left(\frac{172\ \text{GPa}}{94\ \text{GPa}}\right)\left[\frac{2.4\ \text{MPa}\sqrt{\text{m}}}{\sqrt{\pi(5 \times 10^{-6}\ \text{m})}}\right] = 1109\ \text{MPa}$$

ii) Fibras de SiC. Para este material, $a = 5\ \mu$m para grietas superficiales.

$$\sigma_{\text{comp}} = \left(\frac{E_{\text{comp}}}{E_{\text{SiC}}}\right)\left(\frac{K_{\text{IC,SiC}}}{\sqrt{\pi a}}\right) = \left(\frac{172\ \text{GPa}}{350\ \text{GPa}}\right)\left[\frac{4.8\ \text{MPa}\sqrt{\text{m}}}{\sqrt{\pi(5 \times 10^{-6}\ \text{m})}}\right] = 596\ \text{MPa}$$

Así, las fibras de SiC del compuesto de cerámica empiezan a agrietarse cuando el esfuerzo aplicado es de 596 MPa. ◀

sistencias más altas es preciso que haya una buena unión de la intracara entre las fibras y la matriz. Además, debe haber buen acoplamiento entre los coeficientes de expansión de la matriz y de las fibras si el material va a ser utilizado a elevadas temperaturas.

12.10.3 Compuestos de cerámica y nanotecnología

Los investigadores de la nanotecnología han desarrollado recientemente compuestos con matriz de cerámica que tienen propiedades mecánicas, químicas y eléctricas mejoradas, integrando nanotubos de carbono en la microestructura de alúmina convencional. Éste es un adelanto nuevo y excitante que aumentará aún más la importancia de la tecnología en la ciencia de materiales. Los investigadores han logrado crear un compuesto de cerámica hecho de alúmina, 5 a 10 por ciento de nanotubos de carbono y 5 por ciento de niobio finamente molido. El material compacto fue sinterizado y densificado para producir un sólido cuya resistencia a la fractura es hasta cinco veces mayor que la de la alúmina pura. Asimismo, el nuevo material puede conducir electricidad 10 millones de veces más rápido que la alúmina pura. Por último, puede conducir el calor (si los nanotubos están alineados en forma paralela a la dirección del flujo de calor) o actuar como una barrera de protección térmica (si la alineación de los nanotubos es perpendicular a la dirección del flujo de calor). Esto hace que el nuevo material cerámico sea un extraordinario candidato en aplicaciones que requieren recubrimientos de protección térmica.

12.11 HUESO: UN MATERIAL COMPUESTO NATURAL

12.11.1 Composición

El **hueso** es un material estructural que se encuentra en muchos organismos y constituye otro ejemplo de un material compuesto natural complejo, formado por una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos. El componente inorgánico es la **hidroxiapatita** (HA) y tiene una composición de $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$. La hidroxiapatita tiene forma de placa, de 20 a 80 nm de longitud y de 2 a 5 nm de espesor. Este componente inorgánico, que le imparte al hueso su consistencia sólida y dura, constituye 60 a 70 por ciento del peso en seco del hueso. La porción orgánica del hueso consiste sobre todo en una proteína llamada **colágeno** (*tipo I*) y una pequeña cantidad de proteínas no colagenosas. El colágeno es fibroso, tenaz, flexible y altamente inextensible; es lo que proporciona al hueso su flexibilidad y capacidad amortiguadora. El colágeno constituye entre 25 y 30 por ciento del peso del hueso seco. El resto del peso del hueso seco representa agua, en cerca de 5 por ciento. Esto parece muy similar a las propiedades de otros materiales compuestos fibrosos que fueron analizados en secciones anteriores: una mezcla de dos o más materiales de composiciones y propiedades muy diferentes que produce un nuevo material con propiedades únicas.

12.11.2 Macroestructura

La microestructura del hueso es compleja pues contiene muchos componentes, tanto a escala micro como a escala nano. El análisis de la microestructura queda fuera de los objetivos de este texto. Sin embargo, es importante analizar la macroestruc-

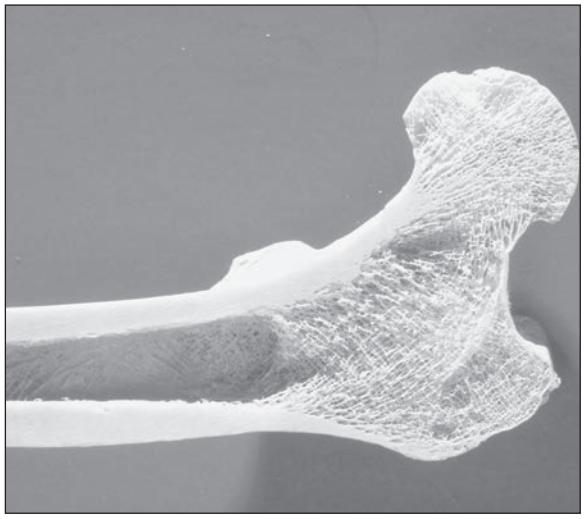
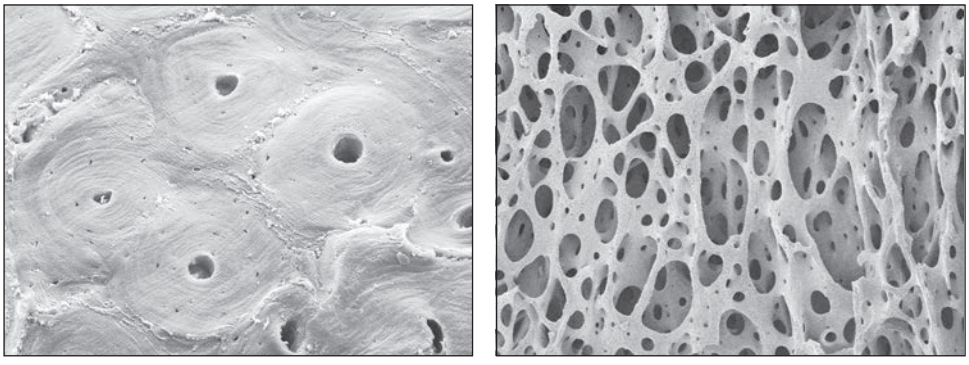


Figura 12.49
Corte longitudinal del fémur de un adulto.
(© Lester V. Bergman/Corbis)



a) *b*)

Figura 12.50
a) Imagen SEM del hueso cortical tomado de una tibia humana.
(© Andrew Syred/Photo Researchers, Inc.)
b) Fotomicrografía de hueso reticular.
(© Susumu Nishinaga/Photo Researchers, Inc.)

tura del hueso porque afecta las propiedades mecánicas del mismo. Aunque los diferentes huesos del cuerpo tienen distintas propiedades y estructura, la estructura de todos los huesos a nivel macroscópico se puede dividir en dos tipos distintivos de tejidos óseos: 1) **cortical o compacto** y 2) **reticulado o trabecular** (figura 12.49). La parte cortical es densa (como de marfil) y forma la estructura externa o corteza del hueso, como se ilustra en la figura 12.50*a*. La porción interna del hueso es el tejido reticular, que está constituido por placas delgadas o trabéculas en un entrama-

do suelto y poroso como se observa en la figura 12.50*b*. Los poros de la región reticular están llenos de médula roja. Los distintos huesos tienen diferentes requisitos funcionales y, por tanto, ostentan distintas relaciones entre el tejido cortical y el reticular, lo cual afecta a sus propiedades.

12.11.3 Propiedades mecánicas

El hueso es un compuesto de materiales orgánicos e inorgánicos en dos fases. Como cualquier otro material, sus propiedades mecánicas pueden determinarse sometiéndolo a una prueba de esfuerzo uniaxial. Igual que otros materiales, en la curva correspondiente de esfuerzo-deformación aparecerá un rango elástico, un límite de elasticidad, una región plástica y un punto de ruptura. Los huesos corticales y reticulados tienen propiedades mecánicas totalmente diferentes. El hueso cortical tiene mayor densidad y es más fuerte y rígido que el hueso reticular; sin embargo, también es más frágil. Cede y se fractura cuando el esfuerzo supera al 2.0 por ciento. En cambio, el hueso reticulado (trabecular) es menos denso y puede soportar un nivel de esfuerzo sostenido de 50 por ciento antes de fracturarse y, en virtud de su estructura porosa, absorbe grandes cantidades de energía antes de quebrarse. En la figura 12.51 se presentan curvas de esfuerzo típicas para huesos corticales y trabeculares de dos densidades diferentes. Allí pueden observarse con claridad las diferencias en módulos de elasticidad, límites de elasticidad, ductilidad, tenacidad y resistencia a la ruptura en el caso de varios huesos.

En la sección 12.3 se analizó el comportamiento anisotrópico de los compuestos reforzados con fibras. Por ejemplo, en la tabla 12.4 se muestra la diferencia observada en las propiedades mecánicas de compuestos epóxicos con fibras de carbono, en las direcciones longitudinal y transversal. El mismo comportamiento anisotrópico se

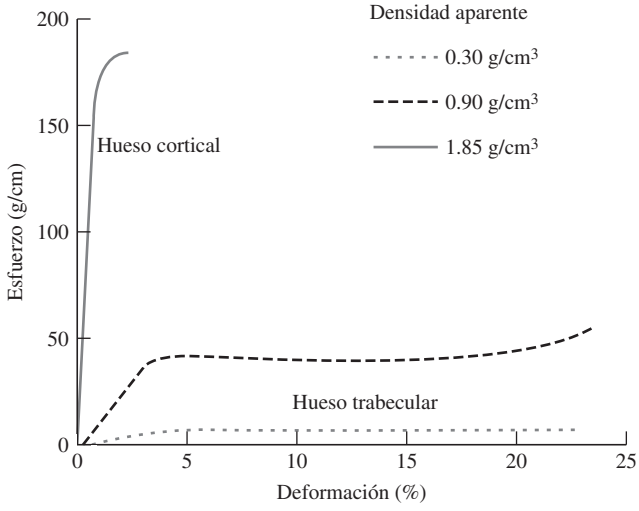


Figura 12.51
Curvas de esfuerzo-deformación para huesos corticales y trabeculares. Obsérvese que la tenacidad (el área correspondiente bajo la curva) del hueso trabecular de 0.9 g/cm^3 es más alta que la del hueso cortical.

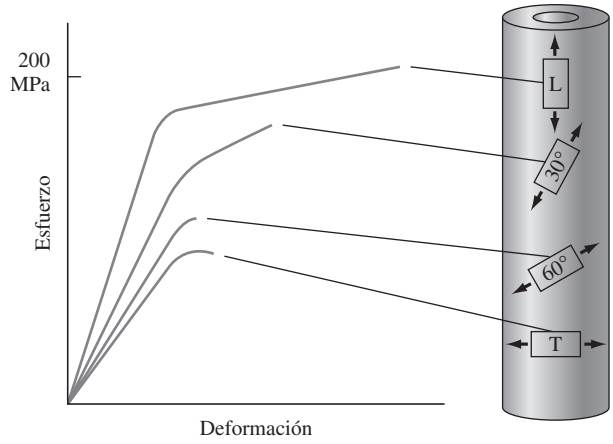


Figura 12.52
Curvas de deformación-esfuerzo de muestras de hueso cortical con diversas orientaciones a lo largo del hueso, mostrando el carácter anisotrópico de éste.

observa en el hueso. Cuando muestras de hueso cortical tomado del cuerpo femoral fueron cortadas en distintas orientaciones y sometidas a pruebas de esfuerzo uniaxial, las curvas correspondientes de deformación-esfuerzo fueron totalmente distintas, como se muestra en la figura 12.52. La muestra que se colocó alineada con el eje longitudinal (L) produjo las más altas lecturas de rigidez, resistencia y ductilidad. En contraste, la muestra que se alineó transversalmente (T) al eje longitudinal produce el modelo más bajo de elasticidad, resistencia y ductilidad. Éste es un indicio claro del comportamiento anisotrópico del hueso. En general, se puede decir que ciertos huesos son más resistentes y rígidos en la dirección en que soportan comúnmente carga durante las actividades normales diarias. Es muy importante señalar que los huesos suelen ser mucho más resistentes a la compresión que a la tensión; por ejemplo, el hueso cortical tiene una resistencia a la tensión de 130 Mpa y una resistencia a la compresión de 190 Mpa. Los huesos reticulados se comportan en forma similar bajo tensión y compresión.

12.11.4 Biomecánica de la fractura de un hueso

Durante las actividades normales diarias, los huesos humanos soportan diversos tipos de cargas, como las de tensión, compresión, flexión, torsión, corte y varias combinadas. Las fracturas por tensión se producen de ordinario en huesos muy reticulados, como el que se encuentra junto al tendón de aquiles, por las grandes fuerzas de tensión que el músculo de la pantorrilla puede ejercer sobre dicho hueso. Las fracturas por corte se presentan también con más frecuencia en huesos muy reticulados. Las fracturas bajo cargas compresivas se producen sobre todo en las vértebras y son más comunes en pacientes de mayor edad que padecen osteoporosis (porosidad de los huesos). La flexión provoca esfuerzos de compresión y tensión en el hueso. Los huesos largos del cuerpo, como el fémur o la tibia, son más vulnerables a este tipo de carga. Los esquiadores están expuestos a fracturas de esa índole (fractura de "la parte superior de la bota") cuando caen de pie: la tibia proximal (parte superior de la

tibia) se dobla hacia el frente; la tibia distal (parte inferior de ésta) soporta el mismo momento de inercia porque el pie y el tobillo están restringidos dentro de la bota; entonces, la tibia se fractura en la parte superior de la bota, donde el contacto con ésta se opone al movimiento (flexión en tres puntos). La fractura empieza siempre en el lado del fémur que está bajo tensión, ya que el hueso es más débil ante la tensión. En los huesos largos del cuerpo humano se producen también fracturas por torsión. Esas fracturas empiezan en dirección casi paralela al eje longitudinal del hueso y se extienden en un ángulo relativo de 30 grados con respecto a dicho eje. La mayoría de las fracturas se presentan en un estado combinado de carga en el que dos o más de los tipos de carga antes mencionados pueden estar presentes.

12.11.5 Viscoelasticidad del hueso

Otra importante forma de comportamiento biomecánico del hueso es su respuesta variable al índice de carga o la tasa de deformación. Por ejemplo, durante la marcha normal se ha medido una tasa de deformación del fémur de 0.001 s^{-1}, aproximadamente; mientras que en la carrera lenta es de unos 0.03 s^{-1}. En un trauma por impacto, la tasa de deformación puede ser tan alta como de 1 s^{-1}. Los huesos reaccionan en forma diferente bajo esas distintas condiciones de la velocidad de aplicación de la carga. Al aumentar la tasa de deformación, el hueso se vuelve más rígido y resistente (se rompe a una carga mayor). En todo el rango de tasas de deformación aplicadas, el hueso cortical se vuelve más fuerte según un factor de tres y su módulo de elasticidad aumenta por un factor de dos. Con tasas de deformación muy altas (trauma por impacto), el hueso se vuelve más frágil, además de que almacena mayores cantidades de energía antes de la fractura. Esto es un aspecto importante en los traumatismos: en una energía de fractura baja, ésta se concentra en la fractura del hueso y el tejido circundante no sufre daños considerables. Sin embargo, en una fractura de alta energía, el exceso de energía disponible ocasiona daños severos al tejido circundante. La dependencia del comportamiento mecánico del hueso con respecto a la tasa de deformación se conoce como **viscoelasticidad**. En comparación, los materiales poliméricos se comportan también en forma viscoelástica bajo índices de carga similares.

Por último, un hueso puede sufrir también fracturas por fatiga. Esto sucede, como con otros materiales, cuando se aplica repetidamente una carga cíclica. Tal puede ser el caso de un atleta sometido a entrenamiento con pesas. Tras muchas repeticiones de carga, los músculos se cansan y, en consecuencia, el hueso soporta una porción mayor de la carga. Debido a la mayor deformación que soporta el hueso, la ruptura por fatiga puede ocurrir después de muchos ciclos.

12.11.6 Remodelación del hueso

En el capítulo 1 se presentó el concepto de materiales inteligentes, los cuales tienen la capacidad de detectar los estímulos del ambiente y responder según sean éstos. El hueso es un ejemplo de un material inteligente biológico complejo. El hueso tiene la capacidad de modificar su tamaño, forma y estructura según las demandas mecánicas que se le imponen. La capacidad del hueso de ganar masa ósea cortical o reticulada bajo un alto nivel de esfuerzo, se llama **remodelación del hueso** y recibe su nombre según la ley de Wolf. Por esa razón, las personas de mayor edad cuya actividad física es restringida, y también los astronautas que trabajan en el ambiente ingrávido del espacio durante largos periodos sufren pérdida de hueso. Se cree que el ejercicio moderado con pesos bajos reduce el fenómeno de pérdida de hueso en la población que envejece.

12.11.7 Nanotecnología y reparación de huesos

En el capítulo 11 se analizó el concepto de la cerámica bioactiva y reabsorbible, y su papel tanto en la reparación de huesos dañados o enfermos, como en el establecimiento de intracaras fuertes entre los tejidos y los implantes (*oseointegración*). Específicamente, el fosfato tricálcico cerámico se mencionó como uno de esos materiales. La investigación actual se concentra en desarrollar cerámica de nanofase a partir de fosfato de calcio y/o sus derivados, como la hidroxiapatita, el carbonato de calcio y los vidrios bioactivos. Habiendo ya explicado que gran parte del hueso está formada por HA de escala nanométrica, puede estimarse la importancia de la nanotecnología en este campo. Los nanomateriales de fosfato de calcio cuyo tamaño de grano es menor de 100 nm han presentado osteoinducción en varios modelos de investigación con animales. Sin embargo, persisten las dudas: "¿el nuevo hueso generado tiene las mismas propiedades que el hueso original?" y "¿hay alguna forma en que se pueda sintetizar una nanocerámica que, después de ser reabsorbida, produzca material de calidad ósea?" Estas preguntas siguen sin respuesta y se requerirán muchos años más de investigación antes que se entienda el comportamiento de esta nanocerámica.

12.12 RESUMEN

Un material compuesto puede definirse, con respecto a la ciencia e ingeniería de materiales, como un sistema de materiales constituido por una mezcla y combinación de dos o más micro o macrocomponentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí.

Algunos materiales compuestos de plástico reforzado con fibra están hechos de fibras sintéticas de vidrio, carbono y aramida. Entre esas tres fibras, las de vidrio son las de menor costo, tienen resistencia intermedia y la más alta densidad, en comparación con las otras. Las fibras de carbono tienen resistencia y módulo elástico altos y baja densidad, pero son caros por lo que sólo se usan en las aplicaciones que requieren su relación especialmente alta de resistencia respecto al peso. Las fibras de aramida tienen alta resistencia y baja densidad, pero no son tan rígidas como las de carbono. Las fibras de aramida son también relativamente caras, por lo cual se usan en aplicaciones en las que se requiere una alta relación resistencia-peso, además de mejor flexibilidad que la de las fibras de carbono. Las matrices que se usan más comúnmente como fibras de vidrio para compuesto de plástico reforzado con fibras, son los poliésteres; mientras que las matrices más utilizadas de ordinario para plásticos reforzados con fibras de carbono, son las epóxicas. Los materiales compuestos epóxicos reforzados con fibras de carbono se usan ampliamente en aplicaciones de aeronáutica y aeroespaciales. Los materiales compuestos de poliéster reforzado con fibras de vidrio tienen un uso mucho más amplio y sus aplicaciones se hacen en diversas industrias que incluyen las de construcción, transporte, marítima y aeronáutica, por ejemplo.

El concreto es un material compuesto cerámico constituido por partículas agregadas (es decir, arena y grava) en una matriz pastosa de cemento endurecido que suele ser de cemento portland. Como material de construcción, el concreto tiene ventajas que incluyen su resistencia útil a la compresión, su economía, la posibilidad de fraguar en la obra, su durabilidad, resistencia al fuego y apariencia estética. La baja resistencia del concreto a la tensión puede elevarse significativamente si se refuerza con varillas de acero. Otra mejoría en la resistencia del concreto a la tensión puede conseguirse introduciendo en él esfuerzos compresivos residuales en posiciones de alta carga de tensión al pretensarlo con refuerzos de acero.

La madera es un material compuesto natural formado, en esencia, de fibras de celulosa ligadas entre sí por una matriz de material polimérico constituido principalmente de lignina. La macroestructura de la madera corresponde al duramen, que está integrado sobre todo por células vivas y transporta los nutrientes; y la albura, que se compone de células muertas. Las maderas se dividen en dos tipos: blandas y duras. Las maderas blandas tienen semillas expuestas y hojas angostas (como agujas), mientras que las maderas duras tienen semillas cubiertas y hojas anchas. La microestructura de la madera consiste en conjuntos de células que predominan en la dirección longitudinal del tronco del árbol. Las maderas blandas tienen largas células tubulares de paredes delgadas llamadas traqueidas, mientras que las maderas duras tienen una estructura celular densa que contiene vasos grandes para la conducción de fluidos. Como material de construcción, la madera tiene ventajas que incluyen: resistencia útil, economía, facilidad para ser trabajada y durabilidad con la debida protección.

El hueso es el material compuesto contenido en el cuerpo humano. Es una mezcla de materiales orgánicos (colágeno) e inorgánicos (hidroxiapatita). La microestructura del hueso incluye dos tipos distintivos de tejidos óseos: cortical y esponjoso. El hueso se comporta de una manera anisotrópica propia de los materiales compuestos. También es importante señalar que el hueso es más resistente a la compresión.

12.13 DEFINICIONES

Sección 12.1

Material compuesto: sistema de materiales constituido por una mezcla y combinación de dos o más micro o macroconstituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí.

Sección 12.2

Plásticos reforzados con fibras: materiales compuestos que consisten en la mezcla de una matriz de material plástico, como poliéster o epóxico, reforzada con fibras de alta resistencia como las de vidrio, carbono o aramida. Las fibras proporcionan la alta resistencia y rigidez, y la matriz plástica une las fibras entre sí y les brinda apoyo.

Fibras de vidrio E: fibras hechas de vidrio E (eléctrico), que es un vidrio de borosilicato del cual se fabrican más comúnmente fibras para el reforzamiento de plásticos con fibra de vidrio.

Fibras de vidrio S: fibras hechas de vidrio S, que es un vidrio de silicato de magnesia-alúmina cuyas fibras se usan en plásticos reforzados con fibra de vidrio cuando se requiere una resistencia especialmente alta en las fibras.

***Roving*:** conjunto de haces de fibras continuas torcidas o sin torcer.

Fibras de carbono (para un material compuesto): fibras de carbono fabricadas principalmente de poliacrilonitrilo (PAN) o brea que se estiran para alinear la estructura de la red fibrilar dentro de cada fibra de carbono y se calientan para eliminar al oxígeno, al nitrógeno y al hidrógeno de las fibras iniciadoras o precursoras.

***Atado* (de fibras):** conjunto de numerosas fibras en un haz cuyas especificaciones se basan en el número de fibras que contiene; por ejemplo, 6 000 fibras/atado.

Fibras de aramida: fibras producidas por síntesis química que se usan para el refuerzo de los de plásticos. Las fibras de aramida tienen una estructura lineal de poliamida aromática (tipo anillos de benceno) y las fabrica comercialmente la Du Pont Co., con el nombre comercial de Kevlar.

Resistencia específica a la tensión: resistencia a la tensión de un material, dividida entre su densidad.

Módulo de tensión específico: módulo de tensión de un material, dividido entre su densidad.

Sección 12.3

Laminado: producto que se hace uniendo entre sí varias láminas de un material, generalmente con calor y presión.

Laminado unidireccional: producto laminado de plástico reforzado con fibras que se elabora uniendo capas de láminas reforzadas con fibras en las que todas éstas son continuas y están en la misma dirección del laminado.

Laminado multidireccional: laminado de plástico reforzado con fibras, que se produce uniendo capas de láminas reforzadas con fibra en las que las direcciones de algunas de las fibras continuas se orientan en distintos ángulos.

Chapa de laminado (lámina): cada una de las capas de un laminado de capas múltiples.

Sección 12.4

Moldeo por colocación manual de capas: proceso de colocar manualmente (y trabajar) capas sucesivas de material de refuerzo en un molde para producir un material compuesto reforzado con fibra.

Moldeo por aspersión: proceso en el que se utiliza una pistola de aspersión para elaborar un producto reforzado con fibra. En un tipo de proceso de aspersión, las fibras trituradas se mezclan con resina plástica y se rocían en un molde para formar una pieza de material compuesto.

Moldeo en bolsa de vacío: proceso para moldear una pieza de plástico reforzado con fibra en el que varias láminas de material flexible transparente se colocan sobre una pieza laminada que no ha sido endurecida. Las láminas y la pieza se sellan y luego se aplica vacío entre las láminas de la cubierta y la pieza laminada, de modo que el aire atrapado se pueda extraer mecánicamente del laminado. A continuación se endurece la pieza colocada en la bolsa de vacío.

Preimpregnado: tela o colchoneta impregnada con resina de plástico lista para moldearse que puede contener fibras de refuerzo. La resina se endurece parcialmente hasta una etapa "B" y se entrega a un fabricante, el cual usa el material para formar las capas de un producto laminado. Una vez que las capas se colocan para producir la forma final, se unen entre sí, generalmente con calor y presión, mediante el endurecimiento del laminado.

Embobinado de filamentos: proceso para producir plásticos reforzados con fibra devanando un refuerzo continuo, previamente impregnado con resina de plástico, en un mandril giratorio. Cuando ya se ha aplicado el número suficiente de capas, la forma embobinada se endurece y el mandril se retira.

Sección 12.5

Compuesto para moldeo por capas (CMC): compuesto de resina plástica, relleno y fibras de refuerzo, que se usa para fabricar materiales compuestos de plástico reforzado con fibra. Un CMC se elabora de ordinario con 25 y 30 por ciento, aproximadamente, de fibras como de 1 pulg (2.54 cm) de largo, entre las cuales la fibra de vidrio es la que se usa más comúnmente. El material CMC se preenvejece usualmente hasta un estado en el que pueda sostenerse por sí mismo y luego se corta al tamaño adecuado y se introduce en un molde de compresión. Una vez prensado en caliente, el CMC se endurece para producir una pieza rígida.

Pultrusión: proceso para producir en forma continua una parte de plástico reforzado con fibras de sección transversal constante. La parte pultruida se elabora haciendo pasar una serie de fibras sumergidas en resina por un dado previamente calentado.

Sección 12.6

Concreto (tipo cemento portland): mezcla de cemento portland, agregado fino, agregado grueso y agua.

Cemento portland: cemento formado principalmente por silicatos de calcio que reaccionan con agua para formar una masa dura.

Agregado: material inerte que se mezcla con cemento portland y agua para producir concreto. Las partículas grandes se llaman agregado grueso (por ejemplo, grava) y las partículas pequeñas se conocen como el agregado fino (por ejemplo, arena).

Reacción de hidratación: reacción del agua con otro compuesto. La reacción del agua con cemento portland es una reacción de hidratación.
Concreto ligero: concreto en el que existe una dispersión uniforme de pequeñas burbujas de aire. Casi 90% de esas burbujas miden 100 μm o menos.
Concreto armado o reforzado: concreto que contiene alambres o barras de acero para resistir esfuerzos de tensión.
Concreto pretensado: concreto reforzado en el que se han introducido esfuerzos de compresión internos para contrarrestar los esfuerzos de tensión resultantes de cargas severas.
Concreto preesforzado (pretensado): concreto pretensado en el que éste se vierte sobre alambres o varillas de acero pretensado.

Sección 12.7
Asfalto: alquitrán constituido principalmente por hidrocarburos con una amplia variedad de pesos moleculares. La mayoría de los asfaltos se obtienen de la refinación de petróleo.
Mezclas de asfalto: combinaciones de asfalto y agregados que se usan principalmente para pavimentar caminos.

Sección 12.8
Madera: material compuesto natural constituido sobre todo por un complejo conjunto de fibras de celulosa en una matriz de material polimérico formada principalmente de lignina.
Lignina: material polimérico tridimensional con enlaces cruzados, muy complejo, que se forma a partir de unidades fenólicas.
Duramen: parte exterior del tronco de un árbol que en la planta viva contiene células vivas donde se almacena alimento para el árbol.
Albura: parte más interna del tronco del árbol que en la planta viva contiene solamente células muertas.
Cámbium: tejido que se localiza entre la madera y la corteza y presenta divisiones celulares repetidas.
Árboles de madera blanda: árboles que tienen semillas expuestas y hojas angostas (agujas). Algunos ejemplos son el pino, el abeto y la picea.
Árboles de madera dura: árboles que tienen semillas cubiertas y hojas anchas. Algunos ejemplos son el roble, el arce y el fresno.
Parénquima: Células que almacenan alimentos en los árboles; su forma es corta y tienen paredes relativamente delgadas.
Radio de la madera: Conjunto de células que se extienden en forma radial en el tronco del árbol; el tejido del rayo está formado principalmente por células de parénquima que almacenan alimento.
Traqueidas (longitudinales): células que predominan en las maderas blandas; las traqueidas desempeñan funciones de conducción y soporte.
Vaso de la madera: estructura tubular formada por la unión de elementos celulares más pequeños en una hilera longitudinal.
Microfibrillas: estructuras elementales que contienen celulosa y forman las paredes de las células de la madera.
Lumen: cavidad en el centro de una célula de madera.

Sección 12.11
Hueso: material estructural del cuerpo humano.
Hidroxiapatita: componente inorgánico del hueso.
Colágeno: componente orgánico del hueso.
Hueso cortical (compacto): hueso denso que constituye la estructura externa.
Hueso reticulado (trabecular): material óseo poroso y blando que forma la estructura interna del hueso.
Viscoelasticidad: tipo de respuesta mecánica de un material que depende del índice de carga o la tasa de deformación.
Remodelación ósea: capacidad del hueso de modificar su tamaño y estructura de acuerdo con los esfuerzos externos.

12.14 PROBLEMAS

Las respuestas a los problemas marcados con un asterisco se encuentran al final del libro.

12.1 Defina un material compuesto con respecto a un sistema de materiales.

12.2 ¿Cuáles son los tres tipos principales de fibras sintéticas que se usan para producir materiales compuestos de plástico reforzado con fibra?

12.3 ¿Cuáles son algunas ventajas de los plásticos reforzados con fibra de vidrio?

12.4 ¿Qué diferencias hay en las composiciones de los vidrios E y S? ¿Cuál es el más resistente y el más caro?

12.5 ¿Cómo se producen las fibras de vidrio? ¿Qué es un *roving* de fibra de vidrio?

12.6 ¿Qué propiedades hacen que las fibras de carbono sean importantes para los plásticos reforzados?

12.7 Se usan dos materiales como precursores de las fibras de carbono ¿Cuáles son?

12.8 ¿Cuáles son los pasos del proceso de producción de fibras de carbono a partir de poliacrilonitrilo? ¿Qué reacciones tienen lugar en cada paso?

12.9 ¿Qué es un atado de fibras de carbono?

12.10 ¿Qué pasos de procesamiento se realizan si se desea producir un tipo de fibra de carbono de muy alta resistencia? Si se desea producir una fibra de carbono con muy alto módulo de elasticidad, ¿qué pasos deben seguirse en el procesamiento?

12.11 ¿Qué es una fibra de aramida? ¿Cuáles son dos tipos de fibras de aramida comercialmente disponibles?

12.12 ¿Qué tipo de enlaces químicos tienen lugar dentro de las fibras de aramida? ¿Qué tipo de enlaces químicos tienen lugar entre las fibras de aramida?

12.13 ¿En qué forma los enlaces químicos dentro y entre las fibras de aramida afectan sus propiedades de resistencia mecánica?

12.14 Compare las propiedades de resistencia a la tensión, módulo de tensión, elongación y densidad de las fibras de vidrio, carbono y aramida (tabla 12.1 y figura 12.8).

12.15 Defina la resistencia a la tensión y el módulo de tensión específico. ¿Qué tipo de fibras de refuerzo, de las que aparecen en la figura 12.9, tienen mayor módulo elástico específico y cuál tiene la más alta resistencia específica a la tensión?

12.16 ¿Cuáles son dos de los plásticos matriz (aglutinantes) más importantes para producir plásticos reforzados con fibra? ¿Cuáles son algunas ventajas de cada tipo?

12.17 ¿En qué forma la cantidad y disposición de las fibras de vidrio en los plásticos reforzados con estas últimas afectan su resistencia?

12.18 ¿Cuáles son las principales contribuciones de las fibras de carbono a las propiedades de los plásticos reforzados con ellas? ¿Cuál es la principal contribución del plástico matriz a dichas propiedades?

12.19 ¿Por qué algunos laminados de compuestos epóxicos con fibras de carbono se diseñan de modo que las fibras de carbono de las distintas capas estén dispuestas a diferentes ángulos unas con respecto a otras?

****12.20** Un compuesto de resina epóxica y fibras de carbono unidireccionales contiene 68 por ciento en volumen de fibra de carbono y 32 por ciento de resina epóxica. La densidad de la fibra de carbono es 1.79 g/cm^3 y la densidad de la resina epóxica es 1.20 g/cm^3. *a*) ¿Cuáles son los porcentajes en peso de las fibras de carbono y la resina epóxica en el compuesto? *b*) ¿Cuál es la densidad promedio del compuesto?

12.21 La densidad promedio de un compuesto epóxico con fibras de carbono es 1.615 g/cm^3. La densidad de la resina epóxica es 1.21 g/cm^3 y la densidad de las fibras de carbono es 1.74 g/cm^3. *a*) ¿Cuál es el porcentaje en volumen de fibras de carbono en el compuesto? *b*) ¿Cuáles son los porcentajes en peso de la resina epóxica y las fibras de carbono en el compuesto?

12.22 Deduzca una ecuación que relacione el módulo elástico de un compuesto de capas de fibras unidireccionales y una matriz plástica bajo carga, en condiciones de isodeformación.

***12.23** Calcule el módulo de elasticidad a la tensión de un material compuesto de plástico reforzado con fibras de carbono que contiene 64 por ciento en volumen de dichas fibras y es sometido a esfuerzos en condiciones de isodeformación. Las fibras de carbono tienen un módulo de elasticidad a la tensión de 54.0×10^6 psi y el material epóxico tiene un módulo de elasticidad a la tensión de 0.530×10^6 psi.

12.24 Si la resistencia a la tensión de las fibras de carbono del material compuesto epóxico con fibras de carbono a 64 por ciento del problema 12.23 es 0.31×10^6 psi y el valor correspondiente de la resina epóxica es 9.20×10^3 psi, calcule la resistencia del material compuesto en psi. ¿Qué fracción de la carga es soportada por las fibras de carbono?

12.25 Calcule el módulo de elasticidad a la tensión de un material compuesto epóxico con fibras unidireccionales de Kevlar 49 que contiene 63 por ciento en volumen de fibras de Kevlar 49 y es sometido a esfuerzos en condiciones de isodeformación. Las fibras de Kevlar 49 tienen un módulo de elasticidad a la tensión de 27.5×10^6 psi y la matriz epóxica tiene un módulo de elasticidad de 0.550×10^6 psi.

***12.26** Si la resistencia a la tensión de las fibras de Kevlar 49 es 0.550×10^6 psi y la de la resina epóxica es 11.0×10^3 psi, calcule la resistencia de material compuesto del problema 12.25. ¿Qué fracción de la carga es soportada por las fibras de Kevlar 49?

12.27 Deduzca una ecuación que relacione el módulo elástico de un compuesto en capas de fibras unidireccionales y una matriz de plástico, sometidos a esfuerzo en condiciones de isotensión.

12.28 Calcule el módulo de elasticidad a la tensión de un compuesto laminado que contiene 62 por ciento en volumen de fibras de carbono unidireccionales y una matriz epóxica en condiciones de isotensión. El módulo de elasticidad a la tensión de las fibras de carbono es 340 GPa y el de la matriz epóxica es 4.50×10^3 MPa.

***12.29** Calcule el módulo de elasticidad a la tensión de un compuesto laminado constituido por 62 por ciento en volumen de fibras unidireccionales de Kevlar 49 y una matriz epóxica sometida a esfuerzos en condiciones de isotensión. El módulo de elasticidad a la tensión de las fibras de Kevlar 49 es 170 GPa y el de la matriz epóxica es 3.70×10^3 MPa.

12.30 Describa el proceso de asentamiento manual para producir una pieza reforzada con fibra de vidrio. ¿Cuáles son algunas ventajas y desventajas de este método?

12.31 Describa el proceso de aspersión para producir una pieza reforzada con fibra de vidrio. ¿Cuáles son algunas ventajas y desventajas de este método?

12.32 Describa el proceso en autoclave con bolsa de vacío para producir una parte de material epóxico reforzado con fibras de carbono para una aeronave.

12.33 Describa el proceso de embobinado de filamentos. ¿Cuál es una ventaja distintiva de este proceso desde el punto de vista del diseño de ingeniería?

12.34 Describa el proceso de manufactura de compuestos mediante el moldeo por láminas. ¿Cuáles son algunas ventajas y desventajas de este proceso?

12.35 Describa el proceso de pultrusión para la manufactura de plásticos reforzados con fibras. ¿Cuáles son algunas ventajas de este proceso?

12.36 ¿Qué ventajas y desventajas tiene el concreto como material compuesto?

12.37 ¿Cuáles son los componentes principales de la mayoría de los concretos?

12.38 ¿Cuáles son las materias primas básicas para fabricar cemento portland? ¿Por qué se llama así el cemento portland?

12.39 ¿Cómo se fabrica el cemento portland? ¿Por qué se agrega una pequeña cantidad de yeso al cemento portland?

12.40 ¿Cuáles son los nombres, las fórmulas químicas y las abreviaturas de los cuatro compuestos principales del cemento portland?

12.41 Mencione los cinco principales tipos ASTM de cemento portland y las condiciones generales en que cada uno se usa y sus aplicaciones.

12.42 ¿Qué tipo de reacciones químicas se producen durante el endurecimiento del cemento portland?

12.43 Escriba la reacción química del C_3S y el C_2S con agua.

12.44 ¿Qué componente del cemento portland endurece rápidamente y es la causa principal de su resistencia inicial?

12.45 ¿Qué componente del cemento portland reacciona lentamente y es la causa principal del endurecimiento al cabo de una semana, aproximadamente?

12.46 ¿Qué componente se mantiene en un nivel bajo en los cementos portland resistentes al sulfato?

12.47 ¿Por qué se añade C_4AF al cemento portland?

12.48 ¿Por qué es importante que en los primeros días del fraguado del concreto se impida o se reduzca la evaporación del agua de su superficie?

12.49 ¿Qué es el concreto ligero? ¿Cuál es una ventaja del concreto ligero?

12.50 ¿Qué método se usa para fabricar concreto ligero? ¿Qué porcentaje de aire, en volumen, se usa en el concreto como protección contra heladas?

12.51 ¿En qué forma la relación agua-cemento (en peso) afecta la resistencia del concreto a la compresión? ¿Qué relación imparte al concreto normal una resistencia a la compresión de unos 5 500 psi? ¿Cuál es la desventaja de una relación agua-cemento demasiado alta? ¿Y de una relación agua-cemento demasiado baja?

12.52 ¿Qué factores principales se deben tomar en cuenta al diseñar mezclas de concreto?

12.53 ¿Cuáles son los rangos de porcentajes absolutos de volumen para los principales componentes del concreto normal?

***12.54** Se desean producir 100 pies^3 de concreto en proporciones de 1:1.9:3.8 (en peso) de cemento, arena y grava. ¿Qué cantidades de estos componentes se requieren si se van a utilizar 5.5 galones de agua por saco? Suponga que los contenidos de humedad libre para la arena y la grava son 3 y 0 por ciento, respectivamente. Las gravedades específicas del cemento, la arena y la grava son 3.15, 2.65 y 2.65, respectivamente. (Un saco de cemento pesa 94 lb y 1 pie^3 de agua = 7.48 gal.) Exprese sus respuestas para el cemento en sacos, para la arena y la grava en libras y para el agua en galones.

12.55 Se desean producir 50 pies^3 de concreto con proporciones de 1:1.9:3.2 (en peso) de cemento, arena y grava. ¿Qué cantidades de los componentes se requieren si se utilizaran 5.5 galones de agua por saco de cemento? Suponga que los contenidos de humedad libre de la arena y la grava son 4 y 0.5 por ciento, respectivamente. Las gravedades específicas del cemento, la arena y la grava son 3.15, 2.65 y 2.65, respectivamente. (Un saco de cemento pesa 94 lb y 1 pie^3 de agua = 7.48 gal.) Exprese sus respuestas para el cemento en sacos, para la arena y la grava en libras y para el agua en galones.

12.56 ¿Por qué en los diseños de ingeniería el concreto se usa principalmente para resistir compresiones?

12.57 ¿Qué es el concreto armado? ¿Cómo se fabrica?

12.58 ¿Cuál es la principal ventaja del concreto preesforzado?

12.59 Describa cómo se introducen esfuerzos de compresión en el concreto pretensado y preesforzado.

12.60 Describa cómo se introducen esfuerzos de compresión en el concreto preesforzado y postensado.

12.61 ¿Qué es el asfalto? ¿De dónde se obtiene?

12.62 ¿Cuáles son los rangos de proporciones de la composición química de los asfaltos?

12.63 ¿En qué consiste una mezcla de asfalto? ¿Cuál es el contenido asfáltico de un asfalto tipo IV para pavimentar caminos?

12.64 ¿Qué características son deseables en el agregado de un asfalto para pavimentar caminos?

12.65 Describa las distintas capas que se encuentran en la sección transversal del tronco de un árbol. Explique también las funciones de cada capa.

12.66 ¿Cuál es la diferencia entre las maderas blandas y las duras? Proponga varios ejemplos de ambas. ¿Son duras, en efecto, todas las maderas duras?

12.67 ¿Qué son los subanillos de los anillos de crecimiento anual de los árboles?

12.68 ¿Cuál de los ejes es paralelo a los anillos anuales? ¿Qué eje es perpendicular al anillo anual?

12.69 Describa la microestructura de un árbol de madera blanda.

12.70 ¿Cuáles son las funciones de los rayos de madera de un árbol?

12.71 Describa la microestructura de un árbol de madera dura. ¿Qué diferencia hay entre las microestructuras anillo-porosas y difuso-porosas de un árbol?

12.72 Describa la ultraestructura de la pared celular de una célula de madera.

12.73 Describa los elementos constitutivos de una célula de madera.

12.74 Un trozo de madera que contiene humedad pesa 210 g y, después de ser secada en un horno hasta un peso constante, pesa 125 g. ¿Cuál es el porcentaje de su contenido de humedad?

12.75 Un trozo de madera contiene 15 por ciento de humedad. ¿Cuál debió haber sido su peso antes de ser secada en un horno si su peso constante es de 125 g después del secado?

12.76 Un trozo de madera contiene 45 por ciento de humedad. ¿Cuál debe ser su peso final después de ser secada en un horno si pesaba 165 g antes del secado?

12.77 ¿Cuál es la causa de la resistencia relativamente alta de la madera en la dirección longitudinal del tronco del árbol, en comparación con la dirección transversal?

12.78 ¿Qué es la condición verde de la madera? ¿Por qué es mucho más débil la madera en condición verde que después de ser secada en estufa?

12.79 ¿Por qué se contrae mucho más la madera en dirección transversal que en dirección longitudinal?

12.80 Un compuesto con matriz de metal consiste en una matriz de aleación de 6061-Al y fibras continuas de boro. Las fibras de boro se producen con un núcleo de alambre de tungsteno de 11.5 μm revestido de boro hasta obtener una fibra cuyo diámetro final es de 107 μm. Un compuesto unidireccional está constituido por 51% en volumen de las fibras de boro de la matriz de Al 2024. Suponiendo que la ley de las mezclas sea aplicable en condiciones de isodeformación, calcule el módulo de tensión del compuesto en la dirección de las fibras. Los datos son $E_B = 370$ GPa, $E_W = 410$ GPa y $E_{Al} = 70.4$ GPa.

***12.81** Un nuevo compuesto con matriz de metal fue desarrollado para un avión de National Aerospace con una matriz del compuesto intermetálico aluminuro de titanio (Ti_3Al) y fibras continuas de carburo de silicio. Un compuesto unidireccional se fabrica disponiendo todas las fibras continuas de SiC en una dirección. Si el módulo del compuesto es 220 GPa y suponiendo condiciones de isodeformación, ¿cuál debe ser el porcentaje en volumen de fibras de SiC en el compuesto si $E(SiC) = 390$ GPa y $E(Ti_3Al) = 145$ GPa?

***12.82** Un material compuesto con matriz de metal se fabrica con una matriz de aleación de Al 6061 y 47% en volumen de fibras continuas de Al_2O_3, todas en una dirección. En condiciones de isodeformación, ¿cuál es el módulo de tensión del compuesto en la dirección de las fibras? Los datos son: $E(Al_2O_3)$ = 395 GPa y E(Al 6061) = 68.9 GPa.

12.83 Una CMM se fabrica con una aleación de Al 2024 con 20% en volumen de filamentos de SiC. Si la densidad del compuesto es 2.90 g/cm^3 y la densidad de las fibras SiC es 3.10 g/cm^3, ¿cuál deberá ser la densidad de la aleación de Al 2024?

12.84 Un compuesto con matriz cerámica se fabrica con fibras continuas de SiC incrustadas en una matriz de *nitruro de silicio ligado por reacción* (NSLR) con todas las fibras de SiC alineadas en una dirección. Suponiendo condiciones de isodeformación, ¿cuál es la fracción en volumen de las fibras de SiC en el compuesto si éste tiene un módulo de tensión de 250 GPa? Los datos son: E(SiC) = 395 GPa y E(NSLR) = 155 GPa.

12.85 La mayor falla preexistente en la matriz de nitruro de silicio ligado por reacción que se menciona en el problema 12.84 es su diámetro de 6.0 μm y la mayor melladura superficial que presentan las fibras de SiC tiene 3.5 μm de profundidad. Calcule el esfuerzo al cual empiezan a formarse grietas en el compuesto cuando la tensión se aplica lentamente en condiciones de isodeformación, en la dirección de las fibras. Los datos son: K_{IC}(RBSN) = 3.5 MPa $-\sqrt{m}$ y K_{IC}(SiC) = 4.8 MPa $-\sqrt{m}$.

12.86 Un compuesto con matriz cerámica está hecho de una matriz de óxido de aluminio (Al_2O_3) y un refuerzo de fibras continuas de carburo de silicio donde todas las fibras de SiC están en la misma dirección. El compuesto contiene 30% en volumen de fibras de SiC. Si existen condiciones de isodeformación, calcule el módulo de tensión del compuesto en la dirección de las fibras. Si una carga de 8 MN se aplica al compuesto en la dirección de las fibras, ¿cuál será la deformación elástica en el compuesto si el área superficial sobre la cual se aplica la carga es de 55 cm^2? Los datos son: $E(Al_2O_3)$ = 350 GPa y E(SiC) = 340 GPa.

12.87 En la matriz del problema 12.86 hay defectos hasta de 10 μm de diámetro y la mayor melladura superficial en las fibras de SiC es de 4.5 μm. *a*) ¿Qué se agrietará primero, la matriz o las fibras? *b*) ¿Qué esfuerzo sobre el compuesto en dirección de las fibras hará que se forme la primera grieta? Los datos son: $K_{IC}(Al_2O_3) = 3.8$ MPa $-\sqrt{m}$ y K_{IC}(SiC) = 4.6 MPa $-\sqrt{m}$.

12.15 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. En general, es cierto que las fibras son más resistentes (en dirección longitudinal) que el material del cual fueron fabricadas. ¿Puede usted explicar por qué?

2. Una viga de sección transversal rectangular (b = 0.3 pulg, h = 0.16 pulg) fue fabricada con acero recocido 1040. *a*) Calcule el producto EI, que se conoce como la *resistencia a la flexión de la viga,* siendo E el módulo de elasticidad e I el momento de inercia de la sección transversal. *b*) Si usted tuviera que fabricar esta misma viga con aluminio 6061-T6, de modo que tuviera la misma resistencia a la flexión, ¿qué valor de H elegiría, en vista de que B no puede cambiar? *c*) Si usted tuviera que fabricar esta viga a partir de materiales compuestos con fibras de carbono unidireccionales (use la tabla 12.4), ¿cuál debería ser el valor de H? *d*) En los tres casos, calcule el peso de la viga si la longitud ya está determinada y es de 6 pies (analice sus resultados).

3. *a*) Si la viga del problema 2 está bajo una flexión pura de 400 lb · pulg y el esfuerzo normal que actúa sobre la sección transversal no va a exceder los 30 ksi, diseñe la

sección transversal para la carga dada. *b*) Determine el peso de cada viga. *c*) Determine el costo del material para cada viga.

4. *a*) Si las tres vigas del problema 2 deben tener la misma área en sección transversal, compare sus valores de resistencia a la flexión. *b*) ¿En qué material tendrá *EI* el valor más alto? *c*) ¿Qué material tendrá mayor resistencia al esfuerzo normal?

5. Un componente que soporta esfuerzos está hecho de aluminio 2024-T4. La compañía desea reducir el peso de este componente, fabricándolo con un laminado de material compuesto con fibras de carbono unidireccionales (sin cambiar sus dimensiones). *a*) Diseñe el contenido de fibras de este laminado, de manera que su módulo de elasticidad sea comparable al del aluminio. *b*) ¿Satisfará su diseño el requisito de aligerar el peso? (Suponga que las condiciones son de isodeformación y que no existen huecos en su material.)

6. Repita el problema 5, pero suponga condiciones de isotensión. Compare los resultados con el problema 5 y saque una conclusión.

7. Al diseñar una caña de pescar tubular se debe tomar en cuenta la resistencia al arqueo (para prevenir el efecto de la paja que se rompe) y la rigidez axial de la caña (para prevenir una deformación elástica excesiva en la misma). *a*) Diseñe un proceso para fabricar cañas de pescar tubulares hechas de compuestos reforzados con fibra. *b*) ¿Qué medidas tomaría usted para asegurar que *i*) haya el soporte adecuado para los esfuerzos de fleje y *ii*) la rigidez axial sea suficiente? *c*) Sugiera materiales apropiados para esta aplicación.

8. *a*) Para diseñar el eje de un palo de golf, ¿qué condiciones mecánicas de carga es necesario tomar en cuenta (suponiendo que un jugador novato vaya a usar el palo)? *b*) ¿Cómo pueden soportar esas condiciones de carga los compuestos reforzados con fibra (proponga un proceso)? *c*) Mencione las ventajas de sustituir los ejes de acero inoxidable con ejes de materiales compuestos.

9. *a*) Compare y contraste las propiedades de los siguientes materiales compuestos reforzados con fibra: Kevlar 49/epoxi, vidrio S/epoxi, SiC/tungsteno, carbono/carbono. *b*) Mencione una aplicación general de cada material.

10. Se puede incrementar la tenacidad de un material de cerámica introduciendo fibras en la estructura de ésta y creando así un compuesto con matriz cerámica. Sin embargo, a diferencia de otros compuestos reforzados con fibra, en este caso el enlace entre la matriz y la fibra no debe ser muy fuerte. Explique de qué manera aumenta la tenacidad del material cerámico por medio de este proceso.

11. Mencione ejemplos de compuestos con matriz de metal y señale sus ventajas sobre los compuestos con matriz de polímero.

CAPÍTULO 13

Corrosión

(© *AP Photo/Robert Nichols*)

El 28 de abril de 1988, un Boeing 737 de Aloha Airline perdió una gran parte de su fuselaje superior mientras estaba en pleno vuelo a una altura de 24 000 pies. El piloto tuvo éxito al aterrizar sin que hubiera daño a la estructura de la aeronave. Los paneles de fuselaje que estaban unidos a las juntas por medio de remaches, se corroyeron. Con el paso del tiempo (en este caso 19 años) esto resultó en la cuarteadura y descomposición de las partes del avión. Como consecuencia, la falla estructural del fuselaje ocurrió en pleno vuelo debido a la fatiga acelerada de la corrosión.[1,2]

Las dos aleaciones de aluminio utilizadas con mayor frecuencia en el recubrimiento del fuselaje, 2024-T3 y 7075-T6, poseen una excelente estática y resistencia a la fatiga; sin embargo, desafortunadamente también tienen una mayor tendencia a sufrir daños por corrosión tales como picaduras o exfoliación. Para evitar que este problema se vuelva a presentar, se siguen lineamientos de inspección más estrictos y así detectar el daño ocasionado por la corrosión. ■

[1] http://www.aloha.net/~icarus/

[2] http://www.corrosion-doctors.org

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Definir la corrosión y las correspondientes reacciones electroquímicas asociadas a menudo con ella.
2. Ser capaces de relacionar la reactividad (catódica contra anódica) de algunos metales puros importantes basados en los potenciales de celda media estándares.
3. Definir una celda galvánica, sus elementos importantes, el papel del electrolito en ella y diversas circunstancias en las cuales se crea una celda galvánica en la vida real.
4. Explicar los aspectos básicos de la cinética de la corrosión y definir la polarización, la pasivación y la serie galvánica.
5. Definir diversos tipos de corrosión y las circunstancias en las cuales tiene lugar cada uno en la vida diaria.
6. Definir la oxidación y cómo se pueden proteger los metales de ella.
7. Nombrar diversas maneras de protección contra la corrosión.

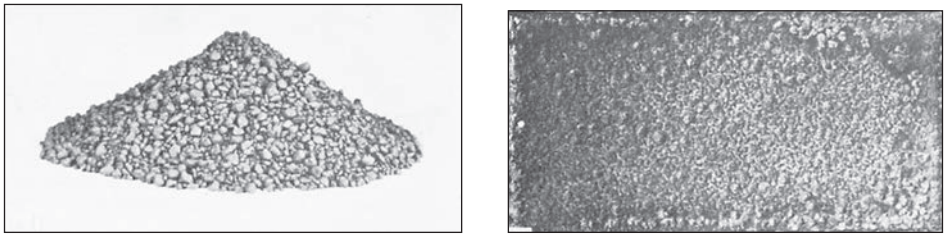
13.1 ASPECTOS GENERALES

La **corrosión** puede definirse como el deterioro de un material producido por el ataque químico de su ambiente. Puesto que la corrosión es una reacción química, la velocidad a la cual ocurre depedenderá hasta cierto punto de la temperatura y de la concentración de los reactivos y productos. Otros factores como el esfuerzo mecánico y la erosión también pueden contribuir a la corrosión.

Cuando se habla de corrosión, es usual referirse al proceso del ataque químico sobre los metales. Éstos son susceptibles a este ataque debido a que tienen electrones libres y pueden establecer celdas electroquímicas dentro de su estructura. La mayoría de los metales son corroídos hasta cierto grado por el agua y la atmósfera. Los metales también pueden ser corroídos por el ataque químico directo de las soluciones químicas e inclusive de metales líquidos.

También es posible considerar a la corrosión de los metales en algunas formas como metalurgia extractiva inversa. Casi todos los metales existen en la naturaleza en el estado combinado, por ejemplo, como óxidos, sulfuros, carbonatos o silicatos. En estos estados combinados las energías de los metales son menores. En el estado metálico las energías de los metales son más altas y, por ello, hay una tendencia espontánea a que los metales reaccionen químicamente para formar compuestos. Por ejemplo, los óxidos de hierro existen comúnmente en la naturaleza y son reducidos a hierro con energía térmica, el cual se encuentra en un estado de energía más alto. Por lo tanto, existe una tendencia para que el hierro metálico regrese de manera espontánea a óxido de hierro mediante la corrosión (oxidándose), de manera que pueda existir en un estado de energía inferior (figura 13.1).

Materiales no metálicos como las cerámicas y los polímeros no sufren el ataque electroquímico pero pueden experimentar un deterioro por ataque químico directo.



a) *b*)

Figura 13.1
a) Mineral de hierro (óxido de hierro). *b*) Productos de corrosión en la forma de herrumbre (óxido de hierro) sobre una muestra de acero (hierro) que ha estado expuesta a la atmósfera. Por la herrumbre, el hierro metálico en la forma de acero ha regresado a su estado original de energía más baja.
(Courtesy of the LaQue Center for Corrosion Technology, Inc.)

Por ejemplo, los materiales cerámicos refractarios pueden ser atacados químicamente a altas temperaturas por sales fundidas. Es posible que los polímeros orgánicos se deterioren a causa del ataque químico de los disolventes orgánicos. Algunos polímeros orgánicos pueden obsorber agua, lo cual causa cambios en las dimensiones o en sus propiedades. La acción combinada del oxígeno y la radiación ultravioleta deteriora a algunos polímeros inclusive a temperatura ambiente.

En consecuencia, la corrosión es un proceso destructivo en cuanto a lo que se refiere a la ingeniería y representa una enorme pérdida económica. Por tanto, no es sorprendente que el ingeniero que trabaja en la industria tenga que ver con el control y prevención de la corrosión. El propósito de este capítulo es servir como una introducción a este importante tema.

13.2 CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA DE LOS METALES

13.2.1 Reacciones de oxidación-reducción

Prueba

En vista de que la mayoría de las reacciones de la corrosión son de naturaleza electroquímica, es importante entender los principios de las reacciones electroquímicas. Considere un pedazo de metal de zinc situado en un matraz de ácido clorhídrico diluido, como se muestra en la figura 13.2. El zinc se disuelve o se corroe en el ácido y se producen cloruro de zinc y gas hidrógeno como se indica mediante la reacción química

$$Zn + 2HCl \rightarrow ZnCl_2 + H_2 \qquad \textbf{(13.1)}$$

Esta reacción puede escribirse en una forma iónica simplificada, omitiendo los iones cloruro, como

$$Zn + 2H^+ \rightarrow Zn^{2+} + H_2 \qquad \textbf{(13.2)}$$

Esta ecuación consta de dos medias reacciones: una para la oxidación del zinc y la otra para la reducción de los iones hidrógeno para formar gas hidrógeno. Estas reacciones de media celda pueden escribirse como

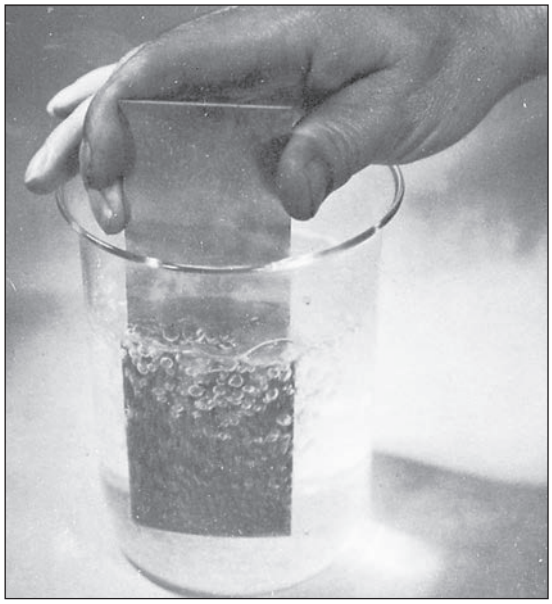


Figura 13.2
Reacción de ácido clorhídrico con zinc para producir gas hidrógeno.
(Cortesía del LaQue Center for Corrosion Technology, Inc.)

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^- \quad \text{(reacción de media celda de oxidación)} \qquad \textbf{(13.3}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \quad \text{(reacción de media celda de reducción)} \qquad \textbf{(13.3}\boldsymbol{b}\textbf{)}$$

Algunos puntos importantes acerca de las reacciones de media celda de la oxidación-reducción son:

1. *Reacción de oxidación*. La reacción de oxidación mediante la cual los metales forman iones que se transforman en una solución acuosa se denomina reacción *anódica*, y las regiones locales sobre la superficie metálica donde ocurre la reacción de oxidación reciben el nombre de **ánodos** *locales*. En la reacción anódica se producen electrones que permanecen en el metal, y los átomos metálicos forman cationes (por ejemplo, $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$).

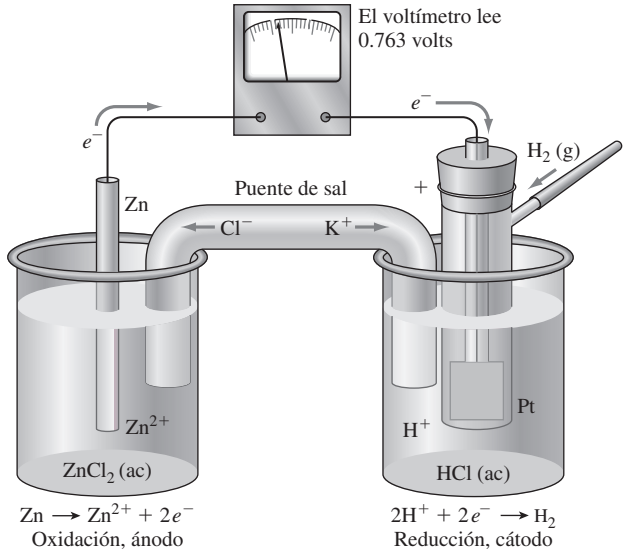
2. *Reacción de reducción*. La reacción de reducción en la que un metal o no metal se reduce en la carga de valencia se conoce como reacción *catódica*. Las regiones locales sobre la superficie metálica donde los iones metálicos o los iones no metálicos se reducen en carga de valencia reciben el nombre de **cátodos** *locales*. En la reacción catódica hay un *consumo de electrones*.

3. Las reacciones de corrosión electroquímica implican reacciones de oxidación que producen electrones y reacciones de reducción que los consumen. Las reacciones tanto de oxidación como de reducción deben ocurrir al mismo tiempo y a la misma velocidad total para evitar la acumulación de carga eléctrica en el metal.

13.2.2 Electrodo estándar de potencial de media celda para metales

Cada metal tiene una tendencia diferente a corrorerse en un ambiente específico. Por ejemplo, el zinc es atacado químicamente o corroído por el ácido clorhídrico diluido, en tanto que eso no ocurre con el oro. Un método para comparar la tendencia de los metales a formar iones en soluciones acuosas es comparar sus potenciales de oxidación o reducción (voltajes) de media celda con el potencial de media celda estándar de hidrógeno-hidrógeno. La figura 13.3 muestra un arreglo experimental para determinar los potenciales del electrodo estándar de media celda.

Para esta determinación se usan dos matraces de soluciones acuosas que se separan mediante un puente de sal de manera que se evita la mezcla mecánica de las soluciones (figura 13.3). En un matraz un electrodo del metal cuyo potencial estándar se va a determinar se sumerge en una solución 1 *M* de sus iones a 25°C. En la figura 13.3 se sumerge un electrodo de Zn en una solución de 1 *M* de iones Zn^{2+}. En el otro matraz se sumerge un electrodo de platino en una solución de 1 *M* de iones H^+ en la cual burbujea gas hidrógeno. Se conecta un alambre en serie con un interrumptor y un voltímetro a los dos electrodos. Cuando se acaba de cerrar el interruptor se mide el



Animación

Figura 13.3
Arreglo experimental para determinar de la fem estándar del zinc. En un matraz un electrodo de Zn se coloca en una solución de 1 *M* de iones de Zn^{2+}. En el otro hay un electrodo de referencia de hidrógeno consistente en un electrodo de platino sumergido en una solución de 1 *M* de iones H^+ que contienen gas H_2 a 1 atm. La reacción completa que ocurre cuando los dos electrodos están conectados por un alambre externo es

$$Zn(s) + 2H^+(ag) \rightarrow Zn^{2+}(ag) + H_2(g)$$

(Tomado de R. E. Davis, K. D. Gailey y K. W. Whitten, "Principles of Chemistry," CBS College Publishing, 1984, p. 635.)

voltaje entre las celdas medias. Al potencial debido a la reacción $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ de la media celda de hidrógeno se le asigna de manera arbitraria el voltaje cero. De esta manera, el voltaje de la reacción de la media celda (zinc) metálica $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ se mide directamente contra el electrodo de la media celda estándar de hidrógeno. Como se indica en la figura 13.3, el potencial del electrodo de la media celda estándar para la reacción $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ es -0.763 V.

La tabla 13.11 enlista las celdas medias estándar de algunos metales seleccionados. A aquellos metales que son más reactivos que el hidrógeno se les asignan potenciales negativos y se dice que son *anódicos ante el hidrógeno*. En el experimento estándar que se ilustra en la figura 13.3, estos metales se oxidan para formar iones, y los iones hidrógeno se reducen para formar gas hidrógeno. Las ecuaciones para las reacciones implicadas son

$$M \rightarrow M^{n+} + ne^- \quad \text{(metal oxidado en iones)} \qquad \textbf{(13.4}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \quad \text{(iones de hidrógeno reducidos a gas hidrógeno)} \qquad \textbf{(13.4}\boldsymbol{b}\textbf{)}$$

A aquellos metales menos reactivos que el hidrógeno se les asignan potenciales positivos y se dice que son *catódicos ante hidrógeno*. En el experimento estándar de la figura 13.3, los iones de este tipo de metales se reducen al estado atómico (y es po-

Tabla 13.1 Potenciales de electrodos estándar a 25°C*

	Reacción de oxidación (corrosión)	Potencial del electrodo ($E°$) (voltios contra electrodo de hidrógeno estándar)
Más catódico (menos tendencia a la corrosión) ▲	$Au \rightarrow Au^{3+} + 3e^-$	+1.498
	$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$	+1.229
	$Pt \rightarrow Pt^{2+} + 2e^-$	+1.200
	$Ag \rightarrow Ag^+ + e^-$	+0.799
	$2Hg \rightarrow Hg_2^{2+} + 2e^-$	+0.788
	$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^-$	+0.771
	$4(OH)^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^-$	+0.401
	$Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$	+0.337
	$Sn^{2+} \rightarrow Sn^{4+} + 2e^-$	+0.150
	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	0.000
Más anódico (mayor tendencia a corroerse) ▼	$Pb \rightarrow Pb^{2+} + 2e^-$	−0.126
	$Sn \rightarrow Sn^{2+} + 2e^-$	−0.136
	$Ni \rightarrow Ni^{2+} + 2e^-$	−0.250
	$Co \rightarrow Co^{2+} + 2e^-$	−0.277
	$Cd \rightarrow Cd^{2+} + 2e^-$	−0.403
	$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$	−0.440
	$Cr \rightarrow Cr^{3+} + 3e^-$	−0.744
	$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$	−0.763
	$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$	−1.662
	$Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$	−2.363
	$Na \rightarrow Na^+ + e^-$	−2.714

*Las reacciones se escriben como medias celdas anódicas. Cuanto más negativa es la reacción de media celda, tanto más anódica es la reacción y tanto mayor la tendencia para que ocurra corrosión u oxidación.

sible que salgan como una placa sobre el electrodo metálico), y el gas hidrógeno se oxida en iones hidrógeno. Las ecuaciones para las reacciones implicadas son

$$M^{n+} + ne^- \rightarrow M \qquad \text{(iones metálicos reducidos a átomos)} \qquad \textbf{(13.5}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \qquad \text{(gas hidrógeno que se oxida como iones hidrógeno)} \qquad \textbf{(13.5}\boldsymbol{b}\textbf{)}$$

13.3 CELDAS GALVÁNICAS

Animación
Prueba

13.3.1 Celdas galvánicas macroscópicas con electrolitos con concentración uno molar

Puesto que la mayor parte de la corrosión metálica incluye reacciones electroquímicas, es importante entender los principios de la operación de un **par galvánico** (**celda**). Una celda galvánica macroscópica puede construirse con dos electrodos metálicos distintos, cada uno sumergido en una solución de sus propios iones. En la figura 13.4, se presenta una celda galvánica de este tipo, la cual tiene un electrodo de zinc inmerso en una solución de 1 *M* de iones de Zn^{2+} y otro de cobre sumergido en una solución de 1 *M* de iones de Cu^{2+} las soluciones están a 25° C. Las dos soluciones están separadas por una pared porosa con el fin de evitar su mezcla mecánica, un alambre externo conectado en serie con un interruptor y un voltímetro conecta a los dos electrodos. Cuando el interruptor acaba de cerrarse, los electrones fluyen desde el electrodo de zinc a través del alambre externo hasta el electrodo de cobre, y se indica un voltaje de –1.10 V en el voltímetro.

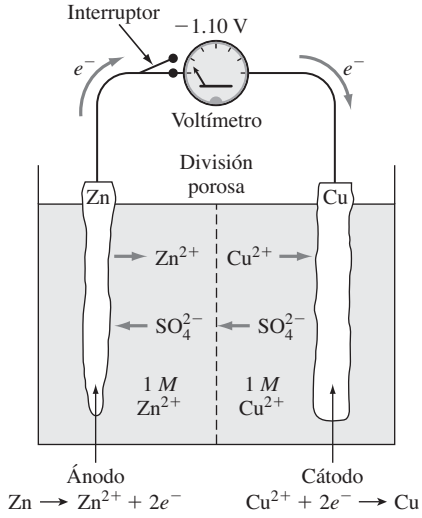


Figura 13.4
Celda galvánica macroscópica con electrodos de zinc y cobre. Cuando se cierra el interruptor y fluyen los electrones, la diferencia de voltaje entre los electrodos de zinc y cobre es −1.10 V. El electrodo de zinc es el ánodo de la celda y se corroe.

En una reacción electroquímica de par galvánico entre dos metales, cada uno sumergido en una solución de 1 *M* de sus propios iones, el electrodo que tiene el potencial de oxidación más negativo será el electrodo que se oxide. En el electrodo que tenga el potencial más positivo ocurrirá una reacción de reducción. En consecuencia, para la celda galvánica de Zn-Cu que se ilustra en la figura 13.4, el electrodo Zn se oxidará en iones Zn^{2+}y los iones Cu^{2+} se reducirán a Cu en el electrodo Cu.

Calculemos ahora el potencial electroquímico de la celda galvánica Zn-Cu cuando el interruptor que conecta a los dos electrodos acaba de cerrarse. Primero, se escriben las reacciones de oxidación de media celda para el zinc y el cobre, utilizando la tabla 13.1

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^- \qquad E^\circ = -0.763 \text{ V}$$
$$Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^- \qquad E^\circ = +0.337 \text{ V}$$

Se observa que la reacción de la media celda de Zn tiene el potencial más negativo (-0.763 V para Zn contra $+0.337$ V para Cu). Por lo tanto, el electrodo de Zn se oxidará en iones Zn^{2+}, y los iones Cu^{2+} se reducirán a Cu en el electrodo Cu. El potencial electroquímico total de la celda, la **fuerza electromotriz** (fem), se obtiene agregando el potencial de media celda de oxidación del Zn al potencial de la media celda de reducción del Cu. Nótese que el signo del potencial de media celda de oxidación debe cambiarse a la polaridad opuesta cuando la reacción de la media celda se escribe como una reacción de reducción.

Note el cambio de signo

Oxidación:	$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$	$E^\circ = -0.763$ V
Reducción:	$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$	$E^\circ = -0.337$ V
Reacción completa (mediante adición):	$Zn + Cu^{2+} \rightarrow Zn^{2+} + Cu$	$E^\circ_{celda} = -1.100$ V

Para un par galvánico, el electrodo que se oxida recibe el nombre de *ánodo* y el electrodo en el que ocurre la reducción se conoce como el *cátodo*. En el ánodo *se producen iones metálicos y electrones,* y puesto que los electrones permanecen en el electrodo metálico, al *ánodo se le asigna la polaridad negativa*. En el cátodo *se consumen los electrones*, y a éste se le asigna la polaridad positiva. En el caso de la celda de Zn-Cu descrita antes, los átomos de cobre se depositan como placa en el cátodo de cobre.

PROBLEMA DE EJEMPLO 13.1

Una celda galvánica está formada por un electrodo de zinc en una solución de 1 *M* de $ZnSO_4$ y otro de níquel en una solución de 1 *M* de $NiSO_4$. Los dos electrodos están separados por una pared porosa de modo que se evita la mezcla de las soluciones. Un alambre externo con un interruptor conecta a los dos electrodos. Cuando el interruptor acaba de cerrarse:

a) ¿En cuál de los electrodos ocurre la oxidación?
b) ¿Cuál de los electrodos es el ánodo de la celda?
c) ¿Cuál electrodo se corroe?
d) ¿Cuál es la fem de la celda galvánica cuando el interruptor acaba de cerrarse?

■ **Soluciones**

Las reacciones de media celda para esta celda son

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^- \qquad E^\circ = -0.763 \text{ V}$$
$$Ni \rightarrow Ni^{2+} + 2e^- \qquad E^\circ = -0.250 \text{ V}$$

a) La oxidación tiene lugar en el electrodo de zinc puesto que la reacción de la media celda de zinc tiene un potencial más negativo E° de -0.763 V cuando se compara con –0.250 V en la reacción de la media celda de níquel.
b) El electrodo de zinc es el ánodo, puesto que la oxidación ocurre en el ánodo.
c) El electrodo de zinc se corroe, ya que en una celda galvánica se corroe el ánodo.
d) La fem de la celda se obtiene al sumar entre si las reacciones de media celda.

Reacción del ánodo:	$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e$	$E^\circ = -0.763$ V
Reacción del cátodo:	$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$	$E^\circ = +0.250$ V
Reacción completa:	$Zn + Ni^{2+} \rightarrow Zn^{2+} + Ni$	$E^\circ_{celda} = -0.513$ V ◀

13.3.2 Celdas galvánicas con electrolitos que no son de concentración uno molar

La mayoría de los electrolitos en las celdas galvánicas de corrosión reales no son de concentración 1 *M*, sino que suelen ser soluciones diluidas mucho menores a dicha cantidad. Si la concentración de iones en un electrolito que rodea a un electrodo anódico es menor que 1 *M*, la fuerza impulsora de la reacción para disolver o corroer el ánodo es mayor puesto que hay una concentración de iones inferior para causar la reacción inversa. De esta manera, habrá una reacción anódica de media celda de fem más negativa:

$$M \rightarrow M^{n+} + ne^- \tag{13.6}$$

El efecto de la concentración de iones metálicos C_{ion} en la fem estándar E° a 25° C está dada por la *ecuación de Nernst*.[3] Para una reacción anódica de media celda en la cual sólo se produce un tipo de ion, la ecuación de Nernst puede escribirse en la forma

$$E = E^\circ + \frac{0.0592}{n} \log C_{ion} \tag{13.7}$$

donde E = nueva fem de la media celda
E° = fem estándar de media celda
n = número de electrones transferidos (por ejemplo, $M \rightarrow M^{n+} + ne^-$)
C_{ion} = concentración molar de iones

En la reacción del cátodo se invierte el signo de la fem final. El problema de ejemplo 13.2 muestra cómo puede calcularse mediante la ecuación de Nernst la fem de una celda galvánica macroscópica en la cual los electrolitos no tienen la concentración 1 *M*.

[3] Walter Hermann Nernst (1864-1941). Químico y físico alemán que hizo trabajo fundamental acerca de soluciones electrolíticas y termodinámica.

PROBLEMA DE EJEMPLO 13.2

Una celda galvánica a 25°C está formada por un electrodo de zinc en una solución de $ZnSO_4$ al 0.10 *M* y otro de níquel en una solución de $NiSO_4$ al 0.05 *M*. Los dos electrodos están separados por una pared porosa y conectados mediante un alambre externo. ¿Cuál es la fem de la celda cuando acaba de cerrarse el interruptor entre los dos electrodos?

■ Solución

Primero, se supone que la disolución de las soluciones al 1 *M* no afectará el orden de los potenciales de Zn y Ni en la serie estándar del potencial de los electrodos. De tal manera, el zinc con un potencial del electrodo más negativo de –0.763 V será el ánodo de la celda electroquímica Zn-Ni y el níquel será el cátodo. Luego, se usa la ecuación de Nernst para modificar los potenciales de estándares equilibrio.

$$E_{\text{celda}} = E^\circ + \frac{0.0592}{n} \log C_{\text{ion}} \qquad \textbf{(13.7)}$$

Reacción del ánodo:
$$E_A = -0.763\ \text{V} + \frac{0.0592}{2} \log 0.10$$
$$= -0.763\ \text{V} - 0.0296\ \text{V} = -0.793\ \text{V}$$

Reacción del cátodo:
$$E_C = -\left(-0.250\ \text{V} + \frac{0.0592}{2} \log 0.05\right)$$
$$= +0.250\ \text{V} + 0.0385\ \text{V} = +0.288\ \text{V}$$

$$\text{Fem de la celda} = E_A + E_C = -0.793\ \text{V} + 0.288\ \text{V} = -0.505\ \text{V} \blacktriangleleft$$

13.3.3 Celdas galvánicas con electrolitos ácidos o alcalinos sin iones metálicos presentes

Considérese una celda galvánica en la cual están sumergidos electrodos de hierro y cobre en un electrolito ácido acuoso en el que no hay iones metálicos presentes en un principio. Los electrodos de hierro y cobre están conectados por un alambre externo, como se indica en la figura 13.5. El potencial estándar de oxidación del electrodo de hierro es -0.440 V y el del cobre corresponde a $+0.337$ V. Por lo tanto, en este par el hierro será el ánodo y se oxidará porque tiene el potencial de oxidación de media celda más negativo. La reacción de media celda en el ánodo de hierro será entonces

$$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^- \qquad \text{(reacción de media celda anódica)} \qquad \textbf{(13.8}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

Puesto que no hay iones de cobre en el electrolito que será reducido a átomos de cobre en una reacción catódica, los iones hidrógeno en la solución ácida se reducirán a átomos de hidrógeno que se combinarán subsecuentemente para formar gas hidrógeno diatómico (H_2). La reacción completa en el cátodo será entonces

$$2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2 \qquad \text{(reacción de media celda catódica)} \qquad \textbf{(13.8}\boldsymbol{b}\textbf{)}$$

Sin embargo, si el electrolito contiene también un agente oxidante, la reacción catódica será

$$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} \qquad \textbf{(13.8}\boldsymbol{c}\textbf{)}$$

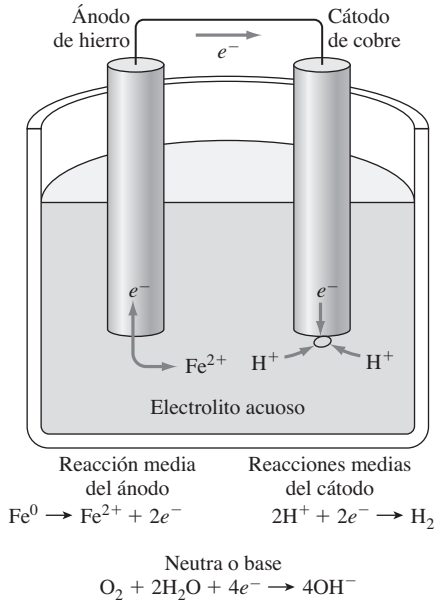


Figura 13.5
Reacciones del electrodo en una celda galvánica de hierro-cobre en la cual no hay iones metálicos inicialmente presentes en el electrolito.
(Tomado de J. Wulff et al., "The Structure and Properties of Materials,"vol II, Wiley, 1964, p. 164.)

Tabla 13.2 Algunas reacciones catódicas comunes en celdas galvánicas acuosas

Reacción del cátodo	Ejemplo
1. Depositación metálica $M^{n+} + ne^- \rightarrow M$	Par galvánico Fe-Cu en solución acuosa Cu^{2+} con iones; $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$
2. Evolución del hidrógeno $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	Par galvánico Fe-Cu en solución ácida sin iones de cobre presentes
3. Reducción del oxígeno (soluciones ácidas): $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	Par galvánico Fe-Cu en solución ácida oxidizante sin iones de cobre presentes
4. Reducción del oxígeno (soluciones neutra o base): $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$	Par galvánico Fe-Cu en solución neutra o alcalina oxidizante sin iones de cobre presentes

Si el electrolito es neutro o básico y hay presencia de oxígeno, este último y las moléculas de agua reaccionarán para formar iones hidroxilo, con la reacción catódica

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \qquad \textbf{(13.8}\boldsymbol{d}\textbf{)}$$

En la tabla 13.2 se enlistan cuatro reacciones comunes que ocurren en las celdas galvánicas acuosas.

13.3.4 Corrosión microscópica de celdas galvánicas microscópicas en un electrodo

Prueba

Si un solo electrodo de zinc se pone en una solución diluida de ácido clorhídrico en ausencia del aire, se corroerá electroquímicamente porque se crearán *ánodos y cátodos locales* en su superficie debido a inhomogeneidades en su estructura y en su composición (figura 13.6*a*). La reacción de oxidación que ocurrirá en los ánodos locales es

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^- \qquad \text{(reacción anódica)} \qquad \textbf{(13.9}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

y la reacción de reducción que se producirá en los cátodos locales es

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \qquad \text{(reacción catódica)} \qquad \textbf{(13.9}\boldsymbol{b}\textbf{)}$$

Ambas reacciones ocurrirán de manera simultánea y a la misma velocidad en la superficie metálica.

Otro ejemplo de corrosión de un solo electrodo es la *oxidación del hierro*. Si una pieza de hierro se sumerge en agua oxigenada, se formará hidróxido férrico [$Fe(OH)_3$] en su superficie como se indica en la figura 13.6*b*. La reacción de oxidación que ocurre en los ánodos locales microscópicos es

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \qquad \text{(reacción anódica)} \qquad \textbf{(13.10}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

Puesto que el hierro está sumergido en agua neutra oxigenada, la reacción de reducción que ocurre en los cátodos locales es

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \qquad \text{(reacción catódica)} \qquad \textbf{(13.10}\boldsymbol{b}\textbf{)}$$

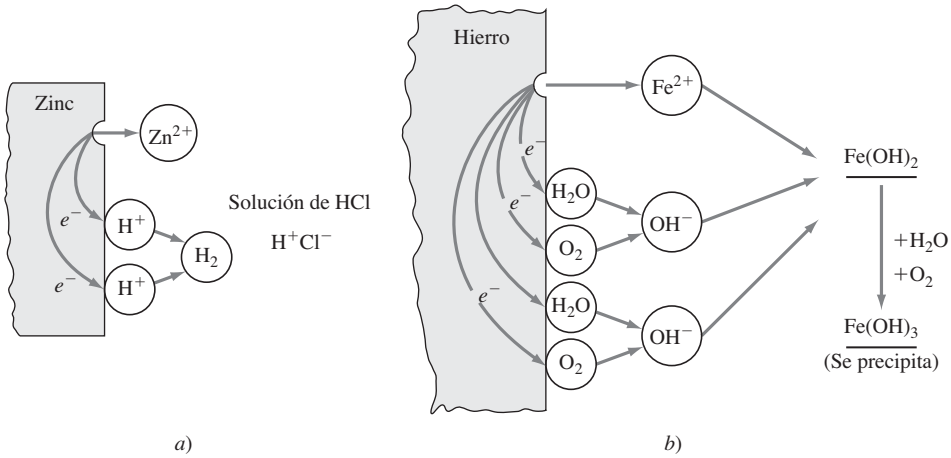


Figura 13.6
Reacciones electroquímicas para *a*) zinc sumergido en ácido clorhídrico diluido y *b*) hierro sumergido en una solución de agua neutra oxigenada.

La reacción total se obtiene al sumar las dos reacciones 13.10*a* y 13.10*b*:

$$2Fe + 2H_2O + O_2 \rightarrow 2Fe^{2+} + 4OH^- \rightarrow \underset{\text{Precipitada}}{2Fe(OH)_2 \downarrow} \qquad \textbf{(13.10}c\textbf{)}$$

El hidróxido ferroso, $Fe(OH)_2$, se precipita a partir de la solución, porque este compuesto es insoluble en soluciones acuosas oxigenadas. Posteriormente se oxida hasta hidróxido férrico, $Fe(OH)_3$, el cual tiene color herrumbroso rojo-café. La reacción para la oxidación del hidróxido ferroso a férrico es

$$2Fe(OH)_2 + H_2O + \tfrac{1}{2}O_2 \rightarrow \underset{\text{Precipitada (herrumbre)}}{2Fe(OH)_3 \downarrow} \qquad \textbf{(13.10}d\textbf{)}$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 13.3

Escriba las reacciones de media celda anódica y catódica para las siguientes condiciones de electrodo-electrolito. Utilice valores $E°$ de la tabla 13.1 como base para sus respuestas.

a) Electrodos de cobre y zinc sumergidos en una solución de sulfato de cobre ($CuSO_4$) diluido.
b) Un electrodo de cobre sumergido en una solución de agua oxigenada.
c) Un electrodo de hierro sumergido en una solución de agua oxigenada.
d) Electrodos de magnesio y hierro conectados mediante un alambre externo y sumergidos en una solución oxigenada de NaCl al 1 por ciento.

■ Solución

a) Reacción anódica: $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ $\quad E° = -0.763$ V (oxidación)
Reacción catódica: $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$ $\quad E° = -0.337$ V (reducción)
Comentario: el zinc tiene un potencial más negativo y por ello es el ánodo. Por lo tanto, se oxida.

b) Se produce poca o ninguna corrosión, pues la diferencia de potencial entre la correspondiente a la oxidación del cobre (0.337 V) y la relativa a la formación del agua a partir de los iones hidroxilo (0.401 V) es muy pequeña.

c) Reacción anódica: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ $\quad E° = -0.440$ V (oxidación)
Reacción catódica: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ $\quad E° = -0.401$ V
Comentario: El Fe tiene un potencial más negativo, por ello es el ánodo; en consecuencia, se oxida.

d) Reacción anódica: $Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$ $\quad E° = -2.36$ V
Reacción catódica: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ $\quad E° = -0.401$ V
Comentario: El magnesio tiene un potencial de oxidación más negativo y, en consecuencia, es el ánodo. Por tanto, el Mg es el elemento que se oxida.

13.3.5 Celdas galvánicas de concentración

Celdas de concentración de iones Considérense unas **celdas de concentración de iones** formadas por dos electrodos de hierro, uno sumergido en un electrolito de Fe^{2+} diluido y el otro en un electrolito de Fe^{2+} concentrado, como se indica en la figura 13.7. En esta celda galvánica el electrodo en el electrolito diluido será el ánodo, porque de acuerdo con la ecuación de Nernst este electrodo tendrá un potencial más negativo con respecto al otro.

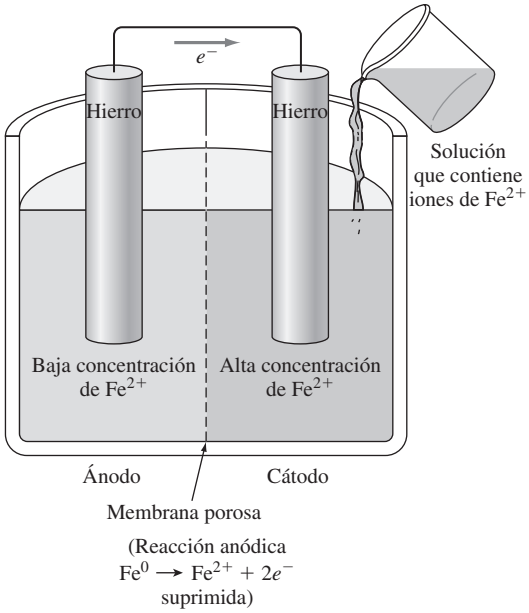


Figura 13.7
Celda galvánica de concentración de iones de dos electrodos de hierro. Cuando el electrolito es de concentraciones diferentes en cada electrodo, el electrodo en el electrolito más diluido se vuelve el ánodo.
(Tomado de J. Wulff et al., "The Structure and Properties of Materials," vol. II, Wiley, 1964, p. 164.)

Se comparará el potencial de media celda de un electrodo de hierro sumergido en un electrodo de Fe^{2+} diluido de 0.001 *M* con el potencial de media celda de otro electrodo de hierro sumergido en un electrolito más concentrado de Fe^{2+} de 0.01 *M*. Los dos electrodos están conectados mediante un alambre externo, como se muestra en la figura 13.7. La ecuación de Nernst general para la reacción de oxidación de media celda relativa a $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$, puesto que $n = 2$, es

$$E_{Fe^{2+}} = E^\circ + 0.0296 \log C_{ion} \qquad \textbf{(13.11)}$$

Para solución de 0.001 *M*: $E_{Fe^{2+}} = -0.440 \text{ V} + 0.0296 \log 0.001 = -0.529 \text{ V}$

Para solución de 0.005 *M*: $E_{Fe^{2+}} = -0.440 \text{ V} + 0.0296 \log 0.01 = -0.499 \text{ V}$

Debido a que −0.529 V es más negativo que −0.499 V, el electrodo de hierro en la solución más diluida será el ánodo de la celda electroquímica y, por tanto, se oxidará y corroerá. De tal modo, la celda de concentración de iones produce corrosión en la región del electrolito más diluido.

PROBLEMA DE EJEMPLO 13.4

Un extremo de un alambre de hierro se sumerge en un electrolito de iones de Fe^{2+} de concentración 0.02 *M* y el otro en un electrolito de iones de Fe^{2+} de concentración 0.005 *M*. Los dos electrolitos están separados por una pared porosa.

a) ¿Qué extremo del alambre se corroerá?
b) ¿Cuál será la diferencia de potencial entre los dos extremos del alambre en el momento de sumergirlos en los electrolitos?

■ Solución

a) El extremo del alambre que se corroerá será el sumergido en el electrolito más diluido, el cual es el de 0.005 *M*. Así, el extremo de alambre en la solución de 0.005 *M* será el ánodo.

b) Si se emplea la ecuación de Nernst con $n = 2$, se obtiene

$$E_{Fe^{2+}} = E^\circ + 0.0296 \log C_{ion} \qquad \textbf{(13.11)}$$

Para solución 0.005 *M*:
$$E_A = -0.440 \text{ V} + 0.0296 \log 0.005$$
$$= -0.508 \text{ V}$$

Para solución 0.02 *M*:
$$E_C = -(-0.440 \text{ V} + 0.0296 \log 0.02)$$
$$= +0.490 \text{ V}$$

$$E_{celda} = E_A + E_C = -0.508 \text{ V} + 0.490 \text{ V} = -0.018 \text{ V} \blacktriangleleft$$

Celdas de concentración de oxígeno Las **celdas de concentración de oxígeno** pueden formarse cuando hay una diferencia en la concentración de oxígeno sobre una superficie húmeda de un metal que es susceptible de oxidarse. Las celdas de concentración de oxígeno son particularmente importantes en la corrosión de metales que se oxidan con facilidad como el hierro que no forma películas de óxido protectoras.

Considérese una celda de concentración de oxígeno formado por dos electrodos de hierro, una en un electrolito de agua con baja concentración de oxígeno y la otra en un electrolito con alta concentración de oxígeno, como se ilustra en la figura 13.8. Las reacciones del ánodo y del cátodo de esta celda son

Reacción anódica: $$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \qquad \textbf{(13.12}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

Reacción catódica: $$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \qquad \textbf{(13.12}\boldsymbol{b}\textbf{)}$$

¿Cuál electrodo es el ánodo en esta celda? Puesto que la reacción del cátodo necesita oxígeno y electrones, la alta concentración de oxígeno deberá estar en el cátodo. Además, en vista que se necesitan electrones en el cátodo, éstos deben producirse en el ánodo que tendrá baja concentración de oxígeno.

Por lo tanto, en general, para una celda de concentración de oxígeno, las regiones que son bajas en oxígeno serán anódicas con respecto a las regiones catódicas que son altas en este elemento. En esta forma, la corrosión se acelerará en las regiones de una superficie metálica donde el contenido de oxígeno sea relativamente bajo, como es el caso de las grietas y hendiduras, y bajo las acumulaciones de depósitos superficiales. Los efectos de las celdas de concentración de oxígeno se analizarán con mayor detalle en la sección 13.5 donde se tratan los diferentes tipos de corrosión.

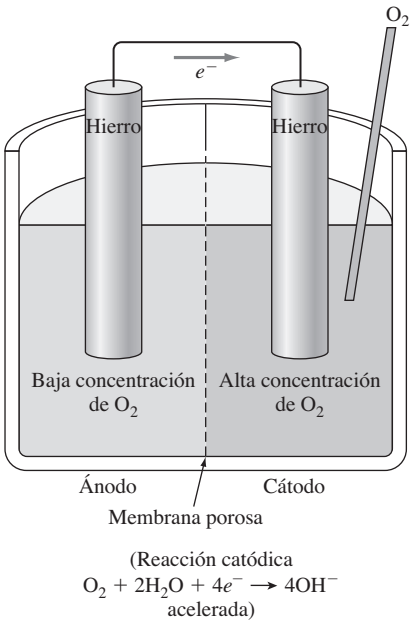


Figura 13.8
Celda de concentración de oxígeno. El ánodo en esta celda es el electrodo que tiene la concentración de oxígeno alrededor de él.
(Tomado de J. Wulff et al., "The Structure and Properties of Materials," vol. II, Wiley, 1964, p. 165.)

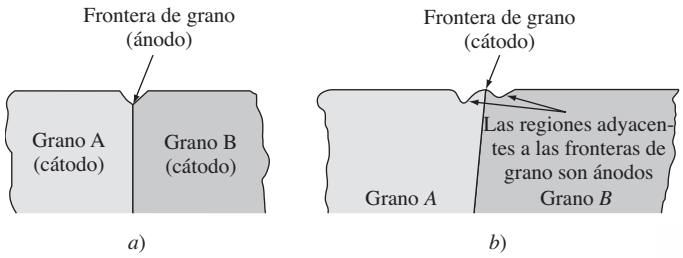


Figura 13.9
Corrosión en o cerca de fronteras de grano. *a*) La frontera de grano es el ánodo de la celda galvánica y se corroe. *b*) La frontera de grano es el cátodo, y las regiones adyacentes a la frontera de grano sirven como ánodos.

Animación

13.3.6 Celdas galvánicas creadas por diferencias en la composición, estructura y esfuerzo

Las celdas galvánicas microscópicas pueden existir en metales o aleaciones debido a diferencias en la composición, estructura y concentración de esfuerzos. Estos factores metalúrgicos afectan seriamente a la resistencia a la corrosión de un metal o aleación; crean regiones anódicas y catódicas de dimensiones variables que pueden provocar corrosión de celda galvánica. Algunos de los factores metalúrgicos importantes que afectan la resistencia a la corrosión son:

1. Celdas galvánicas de frontera grano-grano
2. Celdas galvánicas de fase múltiple
3. Celdas galvánicas de impurezas

Celdas electroquímicas de frontera grano-grano En la mayoría de los metales y aleaciones las fronteras del grano son más activas químicamente (anódicas) que la matriz del grano. De tal modo que, las fronteras de grano se corroen o son atacadas químicamente, como se ilustra en la figura 13.9*a*. La razón del comportamiento anódico de las fronteras de grano es que éstas tienen energías más altas debido al de-

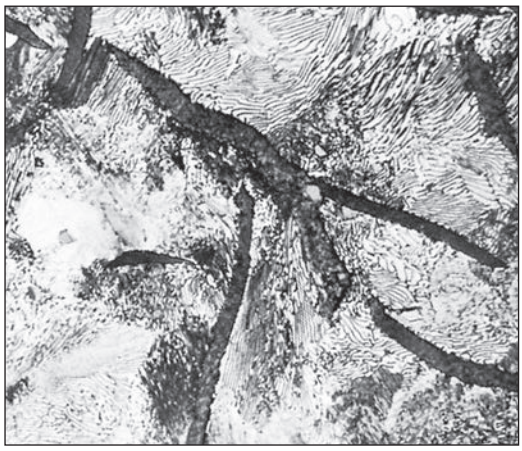


Figura 13.10
Hierro fundido gris clase 30. La estructura consta de escamas de grafito en una matriz de perlita (laminados alternativos de ferrita depositada con luz y cementita más oscura).
(Tomado de "Metals Handbook," vol. 7, 8a. ed., American Society for Metals, 1972, p. 83.)

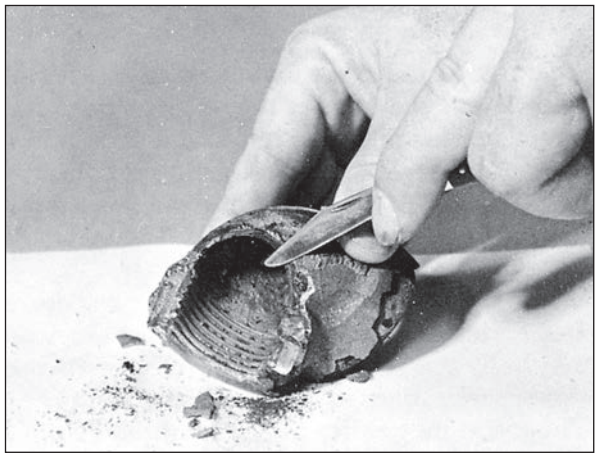


Figura 13.11
Residuo de grafito remanente como resultado de la corrosión de un codo de hierro fundido.
(Cortesía de LaQue Center for Corrosion Technology, Inc.)

sacomodo atómico en esa área y por causa también de la segregación de solutos e impurezas que migran a las fronteras de grano. En algunas aleaciones la situación se invierte, y la segregación química causa que las fronteras de grano se vuelvan más nobles o catódicas que las regiones adyacentes a dichas fronteras. Esta condición provoca que las regiones adyacentes a las fronteras de grano se corroan preferentemente, como se ilustra en la figura 13.9*b*.

Celdas electroquímicas de fase múltiple En la mayoría de los casos una aleación de una fase tiene mayor resistencia a la corrosión que una aleación de fase múltiple, porque se crean celdas electroquímicas en la aleación multifase debido a que una fase es anódica respecto de otra que actúa como el cátodo. De ahí que las velocidades de corrosión son más altas en la aleación multifase. Un ejemplo clásico de corrosión galvánica multifase puede ocurrir en hierro fundido gris de grava perlítica. La microestructura de hierro fundido de grava perlítica consta de escamas de grafito en una matriz de perlita (figura 13.10). Puesto que el grafito es mucho más catódico (más noble) que la matriz de perlita que lo rodea, se crean celdas galvánicas sumamente activas entre las escamas de grafito y la matriz de perlita anódica. En un caso extremo de corrosión galvánica de hierro gris fundido de grava perlítica, la matriz puede corroerse a tal grado que el hierro fundido queda como una red de escamas de grafito interconectados (figura 13.11).

Otro ejemplo del efecto de las fases segundas en la reducción de la resistencia a la corrosión de una aleación es el efecto del templado en la resistencia a la corrosión de un acero al carbón a 0.95%. Cuando este acero está en la condición martensítica después del templado a partir de una condición austenítica, su velocidad de corrosión es relativamente baja (figura 13.12) debido a que la martensita es una solución sólida supersaturada de una fase única de carbón en las posiciones intersticiales de una retícu-

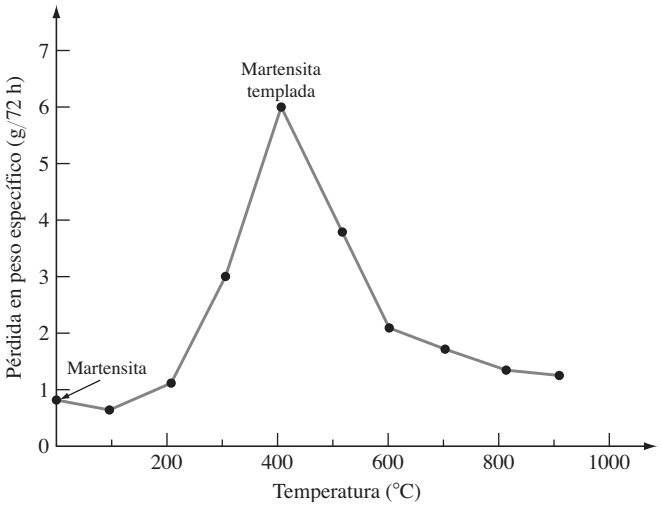


Figura 13.12
Efecto del tratamiento térmico sobre la corrosión de acero al 0.95% de C en H_2SO_4. Especímenes pulidos de 2.5 × 2.5 × 0.6 cm, con tiempo de templado probablemente de 2 horas. *(Heyn y Bauer.)*

la de hierro tetragonal centrada en el cuerpo. Después del templado en el intervalo de 200 a 500°C, se forma un fino precipitado de carburo ϵ y cementita (Fe_3C). Esta estructura de dos fases constituyen celdas galvánicas que aceleran la velocidad de corrosión del acero, como se observa en la figura 13.12. A temperaturas de templado más altas de 500°C, la cementita se fragua y funde en partículas más grandes y la velocidad de corrosión disminuye.

Impurezas Las impurezas metálicas en un metal o aleación pueden llevar a la precipitación de las fases intermetálicas que tienen diferentes potenciales de oxidación con respecto a la matriz del metal. En consecuencia, se crean regiones anódicas o catódicas muy pequeñas que cuando se acoplan con el metal de la matriz pueden originar la corrosión galvánica. Con metales más puros se obtiene una mayor resistencia a la corrosión. Sin embargo, la mayoría de los metales y aleaciones que se usan en la ingeniería contienen cierto nivel de impurezas, y su eliminación es costosa.

13.4 VELOCIDADES (CINÉTICA) DE LA CORROSIÓN

Hasta ahora el estudio de la corrosión de los metales se ha centrado en las condiciones de equilibrio y la *tendencia* de los metales a corroerse, lo cual se ha relacionado con los potenciales de electrodos estándar de metales. Sin embargo, los sistemas que se corroen *no están en equilibrio* y, por ello, los potenciales termodinámicos no indican nada acerca de las velocidades de las reacciones de corrosión. La cinética de los sistemas que se corroen es muy compleja y no se conoce del todo. En esta sección, se examinan algunos de los aspectos básicos de la cinética de la corrosión.

13.4.1 Velocidad de la corrosión uniforme o electrodepositación de un metal en una solución acuosa

La cantidad de metal que se corroe de manera uniforme en un ánodo o que se electrodeposita en un cátodo en una solución acuosa en cierto tiempo se determina utilizando la ecuación de Faraday[4] de la química general, la cual establece que

$$w = \frac{ItM}{nF} \tag{13.13}$$

donde w = peso de metal, g, corroido o electrodepositado en una solución acuosa en el tiempo t, s
I = flujo de corriente, A
M = masa atómica del metal, g/mol
n = número de electrones/átomo producidos o consumidos en el proceso
F = constante de Faraday = 96 500 C/mol o 96 500 A · s/mol

Algunas veces la corrosión acuosa uniforme de un metal se expresa en términos de una densidad de corriente i, que a menudo se expresa en amperes por centímetro cuadrado. Al sustituir I por iA la ecuación 13.13 se convierte en

$$w = \frac{iAtM}{nF} \tag{13.14}$$

donde i = densidad de corriente, A/cm^2 y A = área, cm^2, si se usa el centímetro para la longitud. Las otras cantidades son las mismas que en la ecuación 13.13.

[4] Michael Faraday (1791-1867). Científico inglés que realizó experimentos fundamentales en electricidad y magnetismo. Realizó experimentos para mostrar cómo los iones de unos compuestos migran bajo la influencia de una corriente eléctrica aplicada a electrodos de polaridad opuesta.

PROBLEMA DE EJEMPLO 13.5

Un proceso de electrodeposición de cobre utiliza 15 A de corriente mediante la disolución química (corrosión) de un ánodo de cobre y efectúa un proceso de electrodeposición en un cátodo de cobre. Si se supone que no hay reacciones laterales, ¿cuánto tiempo tardarán en corroerse 8.50 g del cobre del ánodo?

■ Solución

El tiempo para corroer al cobre del ánodo puede determinarse con la ecuación 13.13:

$$w = \frac{ItM}{nF} \quad \text{o} \quad t = \frac{wnF}{IM}$$

En este caso,

w = 8.5 g n = 2 para $Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$ F = 96 500 A · s/mol
M = 63.5 g/mol para Cu I = 15 A t = ? s

o

$$t = \frac{(8.5\text{ g})(2)(96\,500\text{ A}\cdot\text{s/mol})}{(15\text{ A})(63.5\text{ g/mol})} = 1\,722\text{ s o } 28.7\text{ min} \blacktriangleleft$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 13.6

Un tanque cilíndrico de acero fundido de 1 m de altura y 50 cm de diámetro contiene agua aereada hasta un nivel de 60 cm y después de seis semanas presenta una pérdida de peso por corrosión de 304 g. Calcule *a*) la corriente de corrosión y *b*) la densidad de corriente que interviene en la corrosión del tanque. Suponga una corrosión uniforme en la superficie interior del tanque y que el acero se corroe de la misma manera que el hierro puro.

■ Solución

a) Se utilizará la ecuación 13.13 para determinar la corriente de corrosión:

$$I = \frac{wnF}{tM}$$

$w = 304$ g $\quad n = 2$ para $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ $\quad F = 96\,500$ A · s/mol

$M = 55.85$ g/mol para Fe $\quad t = 6$ sem. $\quad I = ?$ A

Es necesario convertir el tiempo, seis semanas, en segundos y después será posible sustituir todos los valores en la ecuación 13.13:

$$t = 6 \text{ sem.} \left(\frac{7 \text{ días}}{\text{sem.}}\right)\left(\frac{24 \text{ h}}{\text{día}}\right)\left(\frac{3\,600 \text{ s}}{\text{h}}\right) = 3.63 \times 10^6 \text{ s}$$

$$I = \frac{(304 \text{ g})(2)(96\,500 \text{ A} \cdot \text{s/mol})}{(3.63 \times 10^6 \text{ s})(55.85 \text{ g/mol})} = 0.289 \text{ A} \blacktriangleleft$$

b) La densidad de corriente es

$$i\,(\text{A/cm}^2) = \frac{I\,(\text{A})}{\text{área}\,(\text{cm}^2)}$$

Área de la superficie corroída del tanque = área de los lados + área del fondo

$$= \pi\, Dh + \pi r^2$$

$$= \pi(50 \text{ cm})(60 \text{ cm}) + \pi(25 \text{ cm})^2$$

$$= 9\,420 \text{ cm}^2 + 1\,962 \text{ cm}^2 = 11\,380 \text{ cm}^2$$

$$i = \frac{0.289 \text{ A}}{11\,380 \text{ cm}^2} = 2.53 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \blacktriangleleft$$

En el trabajo experimental sobre la corrosión, la corrosión uniforme de una superficie metálica expuesta a un ambiente corrosivo se mide de varias maneras. Un método común consiste en medir la pérdida de peso de una muestra expuesta a un ambiente determinado y después de un periodo se expresa la velocidad de corrosión como una pérdida de peso por área unitaria de superficie expuesta por unidad de tiempo. Por ejemplo, la corrosión superficial uniforme se expresa a menudo como *pérdida de peso en miligramos por decímetro cuadrado por día* (mdd). Otro método utilizado comúnmente consiste en expresar la velocidad de corrosión en términos de la pérdida en profundidad del material por tiempo unitario. Ejemplos de la velocidad de corrosión en este sistema son milímetros por año (mm/año) y micrómetros por año (mcm/año).[5] Respecto a la corrosión electroquímica uniforme en ambientes acuosos, es posible ex-

[5] 1 mil = 0.001 pulg.

presar la velocidad de corrosión como una densidad de corriente (véase el problema de ejemplo 13.8).

PROBLEMA DE EJEMPLO 13.7

La pared de un tanque de acero que contiene agua aereada se está corroyendo a una velocidad de 54.7 mdd. ¿En cuánto tiempo el espesor de la pared disminuirá en 0.50 mm?

■ Solución

La velocidad de corrosión es de 54.7 mdd, o 54.7 mg de metal se corroe en cada decímetro cuadrado de superficie por día.

$$\text{Vel. de corrosión en g/(cm}^2 \cdot \text{día)} = \frac{54.7 \times 10^{-3}\ \text{g}}{100\ (\text{cm}^2 \cdot \text{día})} = 5.47 \times 10^{-4}\ \text{g/(cm}^2 \cdot \text{día)}$$

La densidad del Fe = 7.87 g/cm^3. Si se divide la velocidad de corrosión en g/cm^3 · día) entre la densidad en g/cm^3 se obtiene la profundidad de la corrosión por día como

$$\frac{5.47 \times 10^{-4}\ \text{g/(cm}^2 \cdot \text{día)}}{7.87\ \text{g/cm}^3} = 0.695 \times 10^{-4}\ \text{cm/día}$$

El número de días que necesarios para una disminución de 0.50 mm puede obtenerse como el siguiente cociente:

$$\frac{x\ \text{días}}{0.50\ \text{mm}} = \frac{1\ \text{día}}{0.695 \times 10^{-3}\ \text{mm}}$$

$$x = 719\ \text{días} \blacktriangleleft$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 13.8

Una muestra de zinc se corroe uniformemente con una densidad de corrosión de 4.27×10^{-7} A/cm^2 en una solución acuosa. ¿Cuál es la velocidad de corrosión del zinc en miligramos por decímetro por día? La reacción para la oxidación del zinc es $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$.

■ Solución

Para convertir la densidad de corriente a mdd, se usa la ecuación de Faraday (ecuación 13.14) para calcular los miligramos de zinc que se corroen sobre un área de 1 dm^2/día (mdd).

$$w = \frac{iAtM}{nF} \qquad \textbf{(13.14)}$$

$$w\ (\text{mg}) = \left[\frac{(4.27 \times 10^{-7}\ \text{A/cm}^2)(100\ \text{cm}^2)(24\ \text{h} \times 3\,600\ \text{s/h})(65.38\ \text{g/mol})}{(2)(96\,500\ \text{A} \cdot \text{s/mol})}\right]\left(\frac{1\,000\ \text{mg}}{\text{g}}\right)$$

= 1.25 mg de zinc que se corroerán sobre un área de 1dm^2 en un día

o la velocidad de corrosión es de 1.25 mdd. ◀

13.4.2 Reacciones de corrosión y de polarización

Considérese ahora la cinética de la reacción de corrosión del electrodo del zinc que se está disolviendo por medio de ácido clorhídrico como se indica en la figura 13.13. La reacción de media celda anódica para esta reacción electroquímica es

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^- \qquad \text{(reacción anódica)} \qquad \textbf{(13.15}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

La cinética del electrodo para esta reacción se puede representar mediante una gráfica que muestre el potencial electroquímico E (voltios) *versus* log de la densidad de corriente, como se indica en la figura 13.14. Es posible representar el electrodo de zinc en equilibrio con sus iones mediante un punto que indica su potencial de equilibrio $E^\circ = -0.763$ V y una densidad de corriente de intercambio correspondiente $i_0 = 10^{-7}$ A/cm^2 (punto A en la figura 13.14). La densidad de corriente de intercambio i_0 es la velocidad de las reacciones de oxidación y reducción en un electrodo de equilibrio expresada en términos de la densidad de corriente. Las densidades de la corriente de intercambio deben determinarse de manera experimental cuando no hay una corriente neta. Cada electrodo con su electrolito específico tendrá su propio valor i_0.

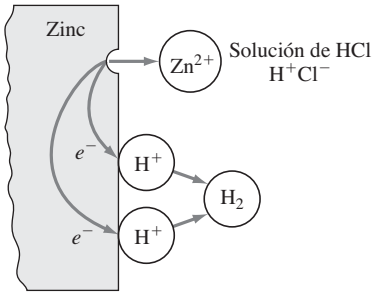


Figura 13.13
Disolución electroquímica de zinc en ácido clorhídrico.
$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$
(reacción anódica)
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
(reacción catódica)

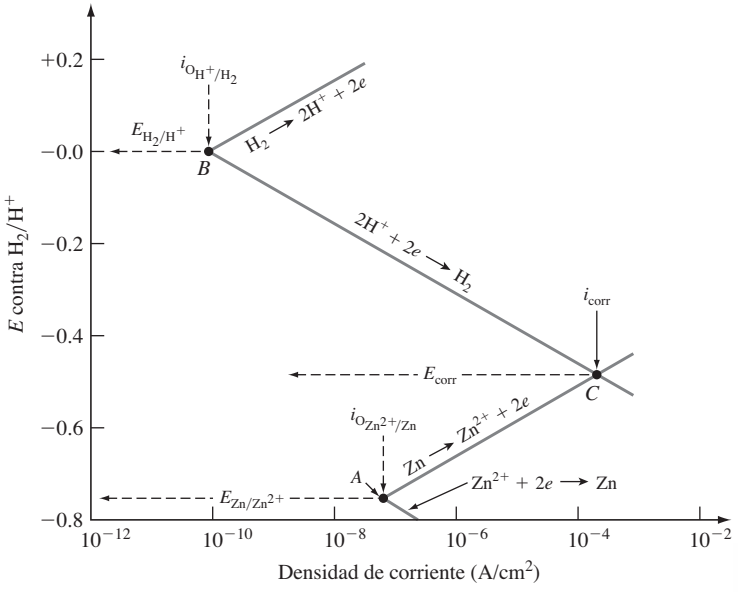


Figura 13.14
Comportamiento cinético del electrodo de zinc puro en una solución ácida (diagrama esquemático).
(Tomado de M. G. Fontana y N. D. Greene, "Corrosion Engineering", 2a. ed., McGraw-Hill, 1978, p. 314.)

Animación

La reacción de media celda catódica para la reacción de corrosión del zinc que se está disolviendo en ácido clorhídrico es

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \qquad \text{(reacción catódica)} \qquad \textbf{(13.15}\boldsymbol{b}\textbf{)}$$

La reacción hidrógeno-electrodo que ocurre en la superficie de zinc en condiciones de equilibrio también puede representarse mediante el potencial del electrodo de hidrógeno reversible $E^\circ = 0.00$ V, y la correspondiente densidad de corriente de intercambio de esta reacción en la superficie de zinc es 10^{-10} A/cm^2 (punto *B* en la figura 13.14).

Cuando el zinc empieza a reaccionar con el ácido clorhídrico (inicio de la corrosión), ya que el zinc es un buen conductor eléctrico, la superficie de éste debe encontrarse a un potencial constante. Este potencial es E_{corr} (figura 13.14, punto *C*). Así, cuando el zinc empieza a corroerse, el potencial de las áreas catódicas debe volverse más negativo para llegar a casi -0.5 V (E_{corr}) y el de las áreas anódicas más positivo para alcanzar -0.5 V (E_{corr}). En el punto *C* de la figura 13.14 la velocidad de disolución del zinc es igual a la velocidad de la evolución del hidrógeno. La densidad de corriente correspondiente a esta velocidad de reacción recibe el nombre de i_{corr} y, por ello, es igual a la velocidad de disolución o corrosión del zinc. El problema de ejemplo 13.8 muestra cómo una densidad de corriente para una superficie que se corroe de manera uniforme puede expresarse en términos de cierta pérdida de peso por unidad de área y de tiempo (por ejemplo, unidades de mdd).

Por tanto, cuando un metal se corroe mediante el cortocircuito de la acción de una celda galvánica microscópica, ocurren reacciones de oxidación y reducción en la superficie metálica. Los potenciales de las regiones locales anódica y catódica ya no están en equilibrio sino que cambian su potencial para alcanzar un valor intermedio constante de E_{corr}. El desplazamiento de los potenciales del electrodo desde sus valores de equilibrio hasta un potencial constante de algún valor intermedio y la creación de un flujo neto de corriente se conoce como **polarización**. La polarización de las reacciones electroquímicas se divide por conveniencia en dos tipos: *polarización de activación y polarización de concentración*.

Polarización por activación Se refiere a reacciones electroquímicas que se controlan mediante un paso lento en una secuencia de pasos de la reacción en la interfase metal-electrolito. Esto es, existe una energía crítica de activación necesaria para superar la barrera de energía asociada con el paso más lento. Este tipo de energía de activación se ilustra considerando la reducción del hidrógeno catódico en una superficie metálica, $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$. La figura 13.15 muestra de manera esquemática algunos de los pasos intermedios posibles en la reducción de hidrógeno sobre una superficie de zinc. En este proceso los iones de hidrógeno emigran hacia la superficie de zinc, y después los electrones se combinan con los iones de hidrógeno para producir átomos de hidrógeno. Dichos átomos se combinan para formar moléculas de hidrógeno diatómico, que a su vez se combinan para formar burbujas de gas hidrógeno. El más lento de estos pasos controlará la reacción de media celda catódica. También existe una barrera de activación-polarización para la reacción de media celda anódica que es la barrera para que los átomos de zinc abandonen la superficie metálica y formen iones de zinc que van hacia el electrolito.

Polarización por concentración La polarización por concentración se asocia con las reacciones electroquímicas controladas por la difusión de iones en el electrolito. Este tipo de polarización se ilustra considerando la difusión de iones de hidrógeno hacia

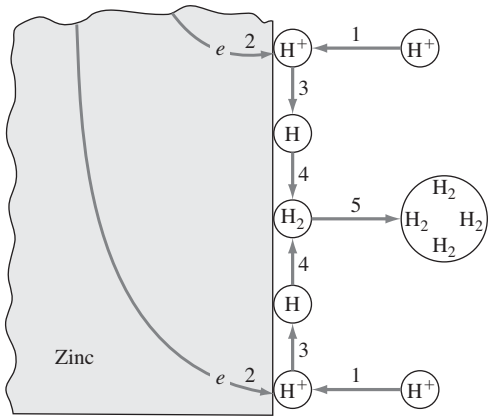


Figura 13.15
Reacción de reducción de hidrógeno en cátodo de zinc en polarización de activación. Las etapas en la formación de gas hidrógeno en el cátodo son: 1) migración de iones de hidrógeno a la superficie de zinc, 2) flujo de electrones a los iones de hidrógeno, 3) formación de hidrógeno atómico, 4) formación de moléculas de hidrógeno diatómico y 5) formación de una burbuja de gas hidrógeno, la cual se rompe en la superficie de zinc. La más lenta de estas etapas será la que limite la velocidad de este proceso de polarización de activación.
(Tomado de M. G. Fontana y N. D. Greene, "Corrosion Engineering", 2ª. ed., McGraw-Hill, 1978, p. 15.)

una superficie metálica para formar gas hidrógeno mediante la reacción catódica $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$, como se muestra en la figura 13.16. En este caso la concentración de iones de hidrógeno es baja y por ello la velocidad de reducción de estos mismos en la superficie metálica se controla mediante su difusión hacia la superficie metálica.

En el caso de la polarización por concentración, cualquier cambio en el sistema que aumente la velocidad de difusión de los iones en el electrolito disminuirá los efectos de la polarización por concentración e incrementará la velocidad de la reacción. En consecuencia, la agitación del electrolito reducirá el gradiente de concentración de iones positivos y aumentará la velocidad de la reacción. El aumento de la temperatura incrementará también la velocidad de difusión de iones y, por lo tanto, aumentará la velocidad de la reacción.

La polarización total en el electrodo en una reacción electroquímica es igual a la suma de los efectos de las polarizaciones por activación y por concentración. La primera suele ser el factor que controla a bajas velocidades de reacción, y la polarización por concentración a velocidades de reacción superiores. Cuando ocurre la polarización principalmente en el ánodo, se dice que la velocidad de corrosión está *controlada anódicamente*, y cuando la polarización sucede principalmente en el cátodo, se dice que la corrosión está *controlada catódicamente*.

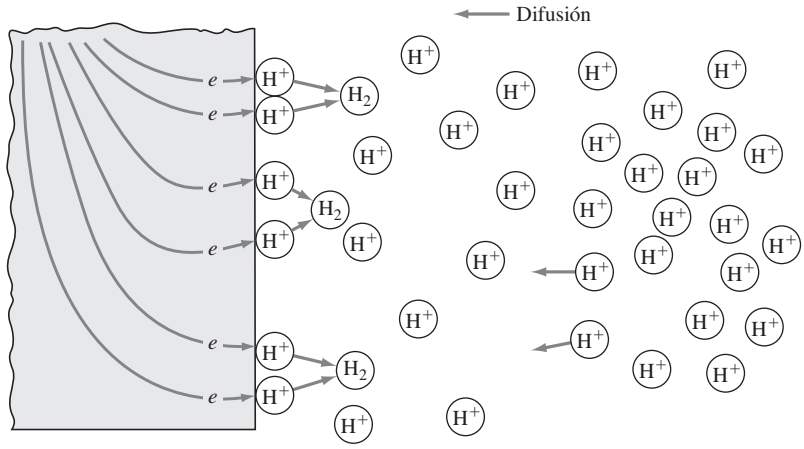


Figura 13.16
Polarización de concentración durante la reacción de reducción cátodo de iones hidrógeno $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ La reacción en la superficie metálica está controlada por la velocidad de difusión de los iones de hidrógeno hacia la superficie metálica.
(Tomado de M. G. Fontana y N. D. Greene, "Corrosion Engineering", 2a. ed., McGraw-Hill, 1978, p. 15.)

13.4.3 Pasivación

La **pasivación** de un metal respecto a la corrosión se refiere a la formación de una capa superficial protectora de productos de la reacción que inhibe las reacciones adicionales. En otras palabras, la pasivación de los metales se refiere a la pérdida de su reactividad química en presencia de una condición ambiental específica. Muchos metales y aleaciones importantes para la ingeniería se vuelven pasivos y, por tanto, muy resistentes a la corrosión en ambientes oxidantes de moderados a intensos. Ejemplos de los metales y aleaciones que muestran pasividad son los aceros inoxidables, el níquel y muchas de sus aleaciones, así como el titanio y el aluminio junto con numerosas aleaciones de los mismos.

Existen dos teorías principales relativas a la naturaleza de la película pasivada: 1) la teoría de la película de óxido y 2) la teoría de la adsorción. En la teoría de la película de óxido se cree que la película pasivada constituye una capa de barrera para la difusión de los productos de la reacción (es decir, óxidos metálicos u otros compuestos) que separan al metal de su ambiente y retardan la velocidad de la reacción. En cuanto a la teoría de la adsorción se cree que los metales pasivados son cubiertos por películas de oxígeno que se absorben químicamente. Se supone que una capa de este tipo desplaza las moléculas H_2O adsorbidas normalmente y retardan la velocidad de la disolución anódica que implica la hidratación de iones metálicos. Ambas teorías tienen en común una película protectora que se forma sobre la superficie metálica para crear el estado pasivado, lo cual origina una mayor resistencia a la corrosión.

La pasivación de los metales en términos de la velocidad de corrosión se ilustra mediante una curva de polarización que indica cómo varía el potencial de un metal con la densidad de corriente, como se muestra en la figura 13.17. Se considerará el comportamiento de pasivación de un metal M cuando se aumenta la densidad de co-

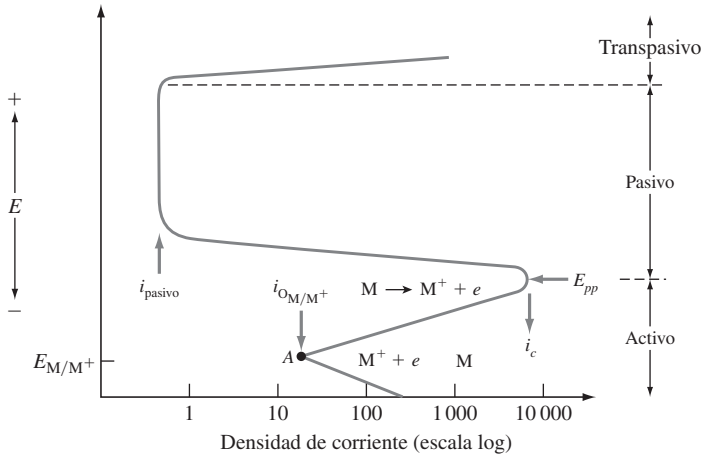


Figura 13.17
Curva de polarización de un metal pasivo.
(Tomado de M. G. Fontana y N. D. Greene, "Corrosion Engineering", 2a. ed., McGraw-Hill, 1978, p. 321.)

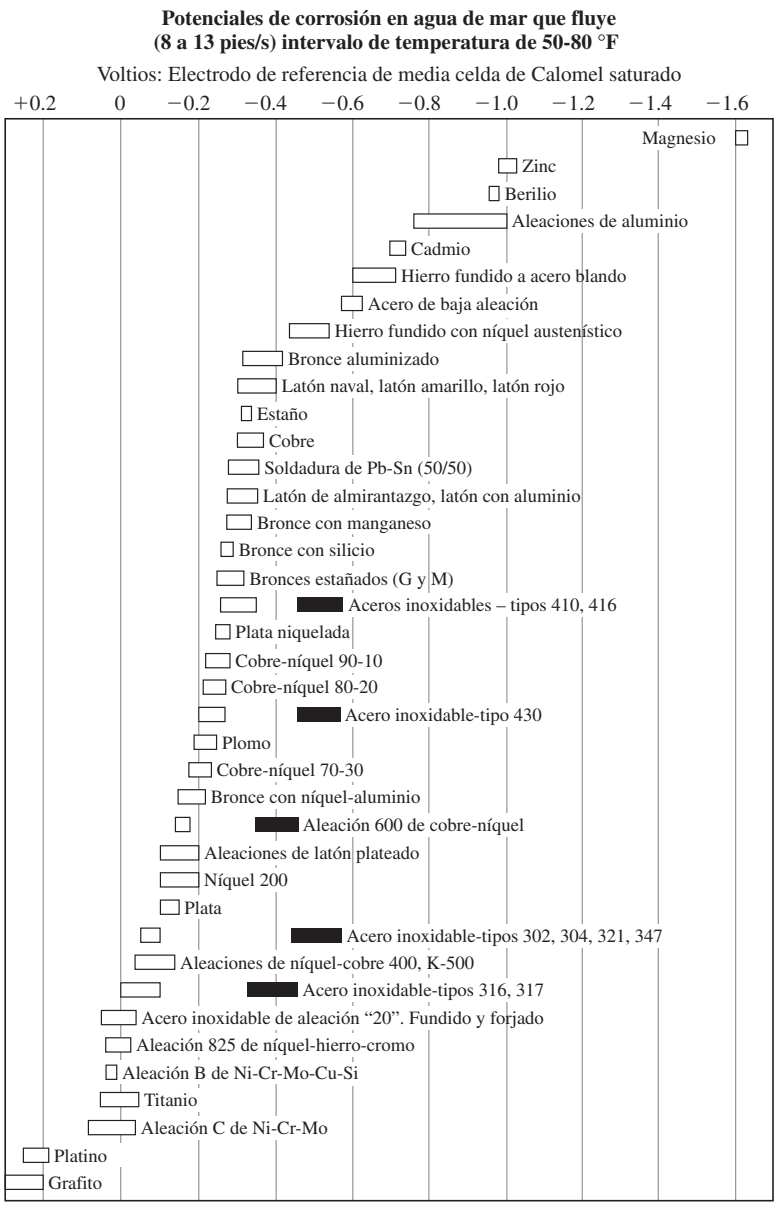
rriente. En el punto A de la figura 13.17 el metal está en su potencial de equilibrio E con su densidad de corriente de intercambio i_0. Cuando el potencial del electrodo se hace más positivo, el metal se comporta como un metal activo, y su densidad de corriente y, en consecuencia, su velocidad de disolución aumentan en forma exponencial.

Cuando el potencial se vuelve más positivo y alcanza el potencial E_{pp}, el potencial pasivo primario, la densidad de corriente y en consecuencia la velocidad de corrosión disminuyen hasta un valor bajo indicado como i_{pasivo}. En el potencial E_{pp}, el metal forma una película protectora sobre su superficie que causa la reactividad disminuida. Cuando el potencial se hace aún más positivo, la densidad de corriente permanece en i_{pasivo} sobre la región pasivada. Un mayor aumento en el potencial más allá de la región pasivada hace que el metal vuelva a ser activo, y la densidad de corriente aumenta en la región transpasivada.

13.4.4 La serie galvánica

Puesto que muchos metales importantes para la ingeniería forman películas pasivadas, no se comportan en las celdas galvánicas como deberían indicar los potenciales de electrodos estándar. Así, en las aplicaciones prácticas donde la corrosión es un factor importante, se ha creado un nuevo tipo de serie conocido como la **serie galvánica** para relaciones anódicas-catódicas. En consecuencia, para cada ambiente corrosivo, es necesario determinar la serie galvánica de manera experimental. En la tabla 13.3 se enlista una serie galvánica de los metales y aleaciones expuestas a agua de mar corriente. Se muestran ahí los diferentes potenciales para las condiciones activas y pasivas de algunos aceros inoxidables. En esta tabla se indica que el zinc es más activo que las aleaciones de aluminio, lo cual es lo inverso al comportamiento indicado para los potenciales de electrodos estándar de la tabla 13.1.

Tabla 13.3 Serie galvánica en agua de mar que fluye



Las aleaciones se listan en orden del potencial que muestren en agua de mar que fluye. Ciertas aleaciones indicadas mediante el símbolo ■ en agua de baja velocidad o mal aereada, y en áreas blindadas, quizá se vuelvan activas y muestren un potencial cercano a –0.5 voltios.

Fuente: Cortesía de LaQue Center for Corrosion Technology, Inc.

13.5 TIPOS DE CORROSIÓN

Se clasifican de manera conveniente de acuerdo con el aspecto del metal corroído. Es posible identificar muchas formas, aunque todas ellas se interrelacionan en diversos grados:

Ataque corrosivo uniforme o general	Corrosión bajo tensión
Corrosión de dos metales o galvánica	Corrosión por erosión
Corrosión por picaduras	Daño por cavitación
Corrosión por agrietamiento	Corrosión por fricción
Corrosión intergranular	Fuga selectiva

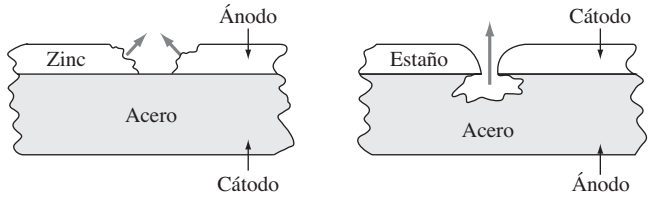
13.5.1 Ataque corrosivo uniforme o general

El ataque corrosivo uniforme se caracteriza por una reacción electroquímica o química que procede de manera uniforme sobre la superficie completa del metal expuesto al ambiente corrosivo. Con base en el peso, el ataque uniforme representa la mayor destrucción de los metales, en particular de los aceros. Sin embargo, es relativamente fácil controlarlo mediante 1) recubrimientos protectores, 2) inhibidores y 3) protección catódica. Estos métodos se analizan en la sección 13.7 sobre el control de la corrosión.

13.5.2 Corrosión de dos metales o galvánica

La corrosión galvánica entre los metales distintos se analizó en las secciones 13.2 y 13.3. Es necesario tener cuidado al juntar metales distintos debido a que la diferencia en su potencial electroquímico puede originar la corrosión.

El acero galvanizado, que es un acero recubierto con zinc, es un ejemplo en el que un metal (zinc) se sacrifica para proteger al otro (acero). El zinc que se sumerge en caliente o electrorrecubre en el acero es anódico con respecto a este último y por ello se corroe y protege al acero, el cual es el catódo en esta celda galvánica (figura 13.18*a*). La tabla 13.4 presenta las pérdidas de peso características del zinc y del acero desacoplados y



a) *b*)

Figura 13.18
Comportamiento anódico-catódico de acero con capas exteriores de zinc y estaño expuestas a la atmósfera. *a*) El zinc es anódico al acero y se corroe (fem estándar del Zn $= -0.763$ V y Fe $= -0.440$ V). *b*) El acero es anódico al estaño y se corroe (la capa delgada se perforó antes que empezara la corrosión) (fem estándar de Fe $= -0.440$ V y Sn $= -0.136$ V).
(Tomado de M. G. Fontana y N. D. Greene, "Corrosion Engineering", 2a. ed., McGraw-Hill, 1978.)

Tabla 13.4 Cambio en peso (en gramos) de acero y zinc acoplados y desacoplados

	Acoplados		Desacoplados	
Ambiente	**Zinc**	**Acero**	**Zinc**	**Acero**
0.05 *M* $MgSO_4$	0.00	−0.04	−0.05	+0.02
0.05 *M* Na_2SO_4	−0.17	−0.15	−0.48	+0.01
0.05 *M* NaCl	−0.15	−0.15	−0.44	+0.01
0.005 *M* NaCl	−0.06	−0.10	−0.13	+0.02

Fuente: M. G. Fontana y N. D. Greene, *Corrosion Engineering*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1978.

acoplados en ambientes acuosos. Cuando el zinc y el acero están desacoplados, ambos se corroen a casi la misma velocidad. Sin embargo, cuando están acoplados, el zinc se corroe en el ánodo de una celda galvánica y por ello protege al acero.

Otro caso del uso de dos metales diferentes en un producto industrial es en la placa de estaño que se usa para la "lata de estaño". La mayoría de las placas de estaño se producen mediante electrodeposición de una placa de estaño delgada sobre una hoja de acero. La naturaleza no tóxica de las sales de estaño hacen que la placa de estaño sea útil para materiales que contengan alimentos. El estaño (fem estándar de −0.136 V) y el hierro (fem estándar de −0.441 V) tienen un compartamiento electroquímico muy parecido. Los cambios ligeros en la disponibilidad del oxígeno y la concentración de iones que se agrupan en su superficie cambiarán su polaridad relativa. En condiciones de exposición atmosférica, el estaño es por lo general catódico respecto del acero. Por lo tanto, si el exterior de una pieza de placa de estaño perforada se expone a la atmósfera, se corroerá el acero, pero no el estaño (figura 13.18*b*). Sin embargo, en la ausencia de oxígeno atmosférico, el estaño es anódico respecto del acero, lo cual hace que el primero sea un material de empaque útil para la comida y las bebidas. Como puede verse en este ejemplo, la disponibilidad del oxígeno es un factor importante en la corrosión galvánica.

Otra consideración importante en la corrosión galvánica de dos metales es el cociente entre las áreas catódica y anódica. Lo anterior se conoce como el *efecto del área*. Una relación de área catódica-anódica desfavorable consiste en una gran área catódica y en una pequeña área anódica. Con cierta cantidad de flujo de corriente hacia el par metálico, tal como el de los electrodos de cobre y hierro de diferentes tamaños, la densidad de corriente es mucho mayor para el electrodo más pequeño que para el más grande. En consecuencia, el electrodo anódico más pequeño se corroerá mucho más rápido. La tabla 13.5 indica que cuando el cociente cátodo-ánodo de un par hierro-cobre se incrementó de 1 a 18.5, la pérdida de peso de hierro aumentó de 0.23 a 1.25 g. Este efecto del área se ilustra también en la figura 13.19 para pares de cobre-acero sumergidos en agua de mar. Los remaches de cobre (cátodos) con un área pequeña sólo causaron un ligero incremento en la corrosión de las placas de acero (figura 13.19*a*). Por otro lado, las placas de acero (cátodos) causaron una severa corrosión de los remaches de acero (ánodos), como se indica en la figura 13.19*b*. En consecuencia, debe evitarse un cociente entre una gran área del cátodo y una pequeña área del ánodo.

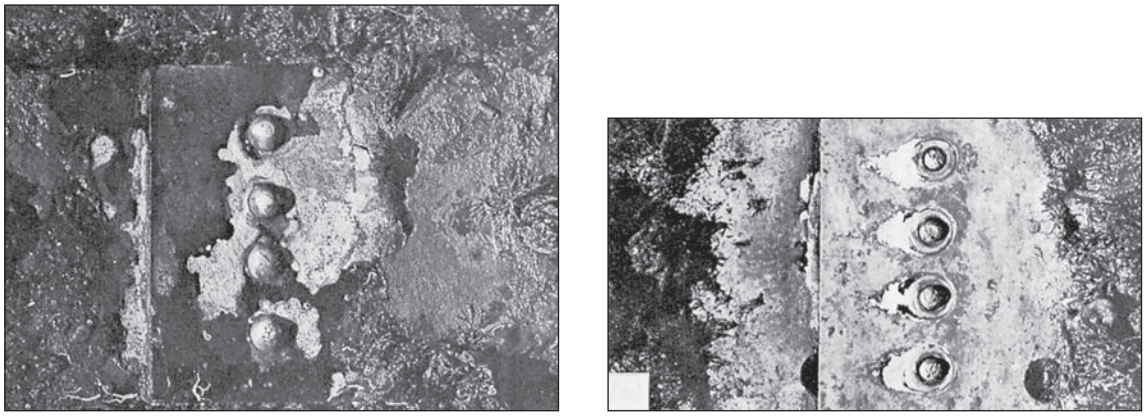
13.5.3 Corrosión por picaduras

Las **picaduras** son una forma de ataque corrosivo localizado que produce hoyos o picaduras en un metal. Esta forma de corrosión es muy destructiva para las estructuras de

Tabla 13.5 Efecto del área sobre corrosión galvánica de hierro acoplado a cobre en 3% de cloruro de sodio

Áreas relativas		
Cátodo	**Ánodo**	**Pérdida (g) en el ánodo (hierro)***
1.01	1	0.23
2.97	1	0.57
5.16	1	0.79
8.35	1	0.94
11.6	1	1.09
18.5	1	1.25

*Pruebas realizadas a 86°F en una solución aereada y agitada durante casi 20 h. El área del nodo era de 14 cm^2.



a) *b*)

Figura 13.19
Efecto de las relaciones de área entre el cátodo y el ánodo para pares cobre-acero sumergidos en agua de mar. *a*) Cátodo pequeño (remaches de cobre) y ánodo grande (placas de acero) sólo causan un daño ligero al acero. *b*) Ánodo pequeño (remaches de acero) y cátodo grande (placas de cobre) provocan corrosión severa de los remaches de acero.
(Cortesía de LaQue Center for Corrosion Technology, Inc.)

ingeniería si llega a perforar el metal. Sin embargo, si no se produce la perforación, se puede aceptar un mínimo de picaduras en los equipos de ingeniería. Las picaduras son difíciles de detectar en ocasiones debido a que las pequeñas pueden estar recubiertas por los productos de corrosión. Además, es posible que varíe bastante el número y profundidad de las picaduras, y hasta cierto punto el daño por picaduras quizá resulte difícil de evaluar. En consecuencia, las picaduras, debido a su naturaleza localizada, pueden con frecuencia producir fallas repentinas e inesperadas.

La figura 13.20 muestra un ejemplo de las picaduras en el acero oxidable expuesto a un ambiente corrosivo agresivo. La corrosión por picaduras de este ejemplo se aceleró, aunque en la mayoría de las condiciones de servicio, es posible que las picaduras necesiten meses o años para perforar una sección metálica. Las picaduras suelen nece-

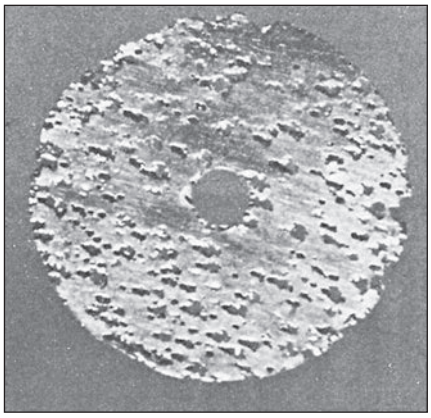


Figura 13.20
Picaduras en un acero inoxidable en un agresivo ambiente corrosivo.
(Cortesía de LaQue Center for Corrosion Technology, Inc.)

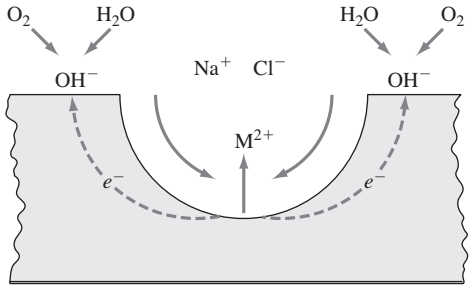


Figura 13.21
Diagrama esquemático del crecimiento de una picadura en acero inoxidable en una solución salina aereada.
(Tomado de M. G. Fontana y N. D. Greene, "Corrosion Engineering", 2a. ed., McGraw-Hill, 1978.)

sitar un periodo de iniciación, pero ya iniciadas, crecen a una velocidad siempre en aumento. La mayoría de las picaduras desarrollan un crecimiento en la dirección de la gravedad y sobre las superficies inferiores del equipo de ingeniería.

Las picaduras se inician en lugares donde ocurren aumentos locales en las velocidades de corrosión. Las inclusiones, otras heterogeniedades estructurales, y heterogeniedades composicionales en la superficie metálica son frecuentes donde se inician las picaduras. Las diferencias en las concentraciones de iones y oxígeno crean celdas de concentración que también pueden iniciar las picaduras. Se cree que la propagación de una picadura implica la disolución de un metal en la picadura mientras se mantiene un alto grado de acidez en el fondo de esta misma. El proceso de propagación de una picadura en un metal ferroso que se encuentra en un ambiente de agua de mar aereada se ilustra en la figura 13.21. La reacción anódica del metal en el fondo de la picadura es $M \rightarrow M^{n+} + e^-$. La reacción catódica ocurre en la superficie metálica que rodea a la picadura y es la reacción del oxígeno con agua y de los electrones de la reacción anódica: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$. En esta forma, el metal que rodea a la picadura queda protegido catódicamente. El incremento de la concentración de los iones metálicos en la picadura atrae a los iones cloruro para mantener la neutralidad de la carga. El cloruro metálico reacciona después con el agua para producir el hidróxido metálico y ácido libre como

$$M^+Cl^- + H_2O \rightarrow MOH + H^+Cl^- \qquad \textbf{(13.16)}$$

De este modo, se genera una concentración sumamente ácida en el fondo de la picadura, lo cual provoca que aumente la velocidad de la reacción anódica, y que el proceso completo se vuelva *autocatalítico*.

Para evitar la corrosión por picaduras en el diseño de equipo de ingeniería, es neceario usar materiales que no tengan tendencias a la corrosión por picaduras. Sin em-

Tabla 13.6 Resistencia a picaduras relativa de algunas aleaciones resistentes a la corrosión

Acero inoxidable tipo 304	Incremento a la resistencia a las picaduras ↓
Acero inoxidable tipo 316	
Hastelloy F, Nionel o Durimet 20	
Hastelloy C o Clorimet 3	
Titanio	

Fuente: M. G. Fontana y N. D. Greene, *Corrosion Engineering*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1978.

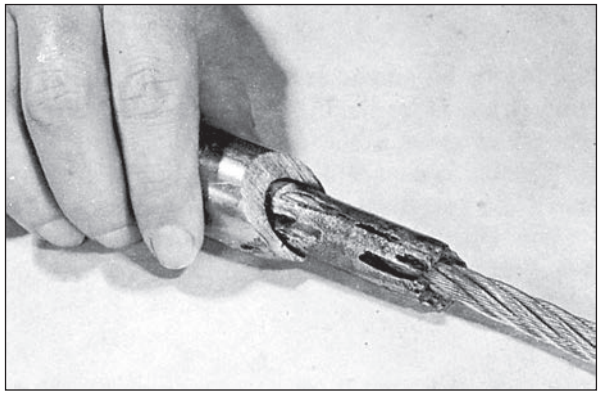


Figura 13.22
Corrosión por grietas de un gancho de anclaje.
(Cortesía de LaQue Center for Corrosion Technology, Inc.)

bargo, si esto no es posible en algunos diseños, entonces es imprescindible recurrir a materiales con la mejor resistencia a la corrosión. Por ejemplo, si es necesario utilizar aceros inoxidables en la presencia de algunos iones cloruro, la aleación tipo 316 con 2% de molibdeno además de 18% de Cr y 8% de Ni tiene mejor resistencia a las picaduras que la aleación 305, la cual sólo contiene 18% de Cr y 8% de Ni como los principales elementos de la aleación. En la tabla 13.6 se presenta una guía cualitativa para el orden de resistencia a las picaduras de algunos materiales resistentes a la corrosión lista. Sin embargo, se recomienda realizar pruebas de corrosión a varias aleaciones antes de la elección final de alguna aleación resistente a la corrosión.

13.5.4 Corrosión por agrietamiento

La corrosión por grietas es una forma de corrosión electroquímica localizada que puede ocurrir en las grietas y bajo superficies recubiertas donde sea posible que existan soluciones estancadas. La corrosión por grietas es importante para la ingeniería cuando ocurre bajo las juntas, remaches y pernos, entre discos y asientos de válvulas, bajo depósitos porosos, así como en muchas otras situaciones similares. La corrosión por grietas se presenta en muchos sistemas de aleaciones tales como aceros inoxidables y titanio, aleaciones de aluminio y cobre. En la figura 13.22 se muestra un ejemplo del ataque de corrosión por grietas de un gancho de ancla fija.

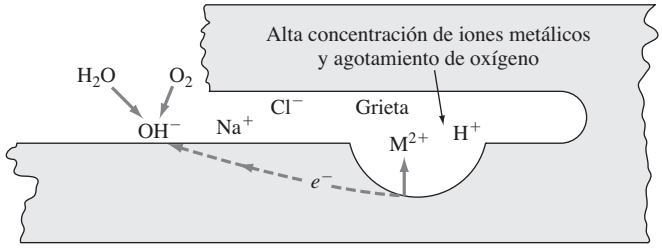


Figura 13.23
Diagrama esquemático del mecanismo de corrosión por grietas.
(Tomado de M. G. Fontana y N. D. Greene, "Corrosion Engineering", 2a. ed., McGraw-Hill, 1978.)

Para que la corrosión por grietas ocurra, la grieta debe ser lo bastante ancha para que entre un líquido, pero lo suficientemente estrecha para mantenerlo estancado. Por tanto, la corrosión por grietas suele ocurrir en donde haya una abertura de unos cuantos micrómetros (mcm) o menos de ancho. Las juntas fibrosas que pueden actuar como mechas para absorber una solución electrolítica y mantenerla en contacto con la superficie metálica forman lugares ideales para la corrosión por grietas.

Fontana y Greene[6] han propuesto un mecanismo para la corrosión por grietas similar a uno que propusieron para la corrosión por picaduras. La figura 13.23 ilustra este mecanismo para la corrosión por grietas en un acero inoxidable que se encuentra en contacto con una solución aereada de cloruro de sodio. Este mecanismo supone que en un principio las reacciones anódicas y catódicas sobre la superficie de la grieta son

$$\text{Reacción anódica:} \quad M \rightarrow M^+ + e^- \qquad \textbf{(13.17}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

$$\text{Reacción catódica:} \quad O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \qquad \textbf{(13.17}\boldsymbol{b}\textbf{)}$$

Puesto que la solución está estancada en la grieta, el oxígeno necesario para que se efectúe la reacción catódica se consume y no se reemplaza. Sin embargo, la reacción anódica $M \rightarrow M^+ + e^-$ continúa operando y crea una alta concentración de iones cargados positivamente. Para equilibrar la carga positiva, los iones cargados negativamente, principalmente los iones cloruro, migran hacia la grieta y forman M^+Cl^-. Este cloruro es hidrolizado por el agua para formar el hidróxido metálico y el ácido libre, de acuerdo con

$$M^+Cl^- + H_2O \rightarrow MOH + H^+Cl^- \qquad \textbf{(13.18)}$$

Esta formación del ácido rompe la película pasivada y provoca el ataque químico, el cual es autocatalítico, como en el caso que acaba de comentarse para la corrosión por picaduras.

Para el acero inoxidable tipo 304 (18% Cr-8% Ni), Peterson *et al.*[7] han deducido a partir de sus pruebas que la acidificación dentro de la grieta se debe principalmente a la hidrólisis de iones crómicos,

---

[6] *Corrosion Engineering*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1978.
[7] M. H. Peterson, T. J. Lennox y R. E. Groover, *Mater. Prot.,* enero de 1970, p. 23.

$$Cr^{3+} + 3H_2O \rightarrow Cr(OH)_3 + 3H^+ \quad \textbf{(13.19)}$$

puesto que sólo encontraron trazas de Fe^{3+} en la grieta.

Para evitar o minimizar la corrosión por grietas en los diseños de ingeniería, es posible recurrir a los siguientes métodos:

1. Usar juntas de contacto soldadas firmemente en vez de remachadas o atornilladas en las estructuras de ingeniería.

2. Diseñar recipientes para drenaje total donde las soluciones estancadas se puedan acumular.

3. Utilizar juntas no absorbentes, como el Teflón, si es posible.

13.5.5 Corrosión intergranular

La **corrosión intergranular** es un ataque corrosivo localizado en y/o adyacente a las fronteras de grano de una aleación. En condiciones comunes si un metal se corroe de manera uniforme, las fronteras de grano sólo serán un poco más reactivas que la matriz. Sin embargo, en otras condiciones, las regiones de la frontera de grano pueden ser muy reactivas, y causar corrosión intergranular que provoca la pérdida de resistencia de la aleación inclusive la desintegración en las fronteras de grano.

Por ejemplo, muchas aleaciones de alta resistencia de aluminio así como algunas de cobre que tienen fases precipitadas para endurecerlas son susceptibles a la corrosión intergranular en ciertas condiciones. Sin embargo, uno de los ejemplos más importantes de la corrosión intergranular tiene lugar en algunos aceros inoxidables austeníticos (18% Cr-8% Ni) que se calientan o se enfrían lentamente en el intervalo de temperatura de 500 a 800°C (950 a 1 450°F). En este denominado *intervalo de temperatura de sensibilización*, los carburos de cromo ($Cr_{23}C_6$) pueden precipitarse en las interfases de las fronteras de grano, como se muestra en la figura 13.24*a*. Cuando los carburos de cromo se han precipitado a lo largo de las fronteras de grano en aceros inoxidables austeníticos, se dice que estas aleaciones están en la *condición sensibilizada*.

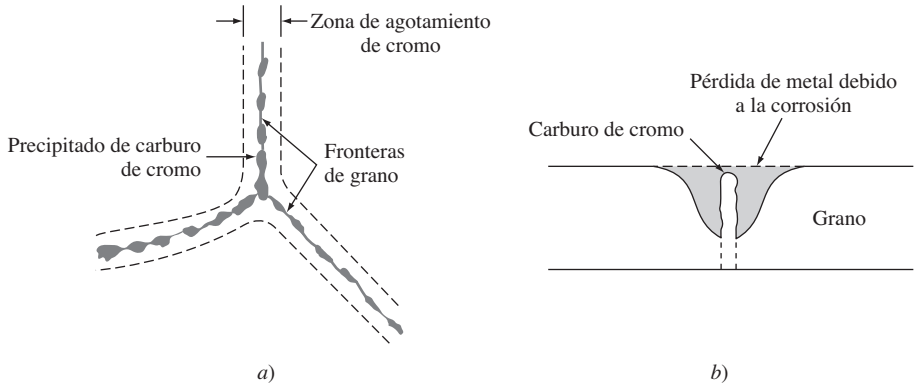


Figura 13.24
a) Representación esquemática de la precipitación de carburo de cromo en fronteras de grano en un acero inoxidable tipo 304 sensibilizado. *b*) Sección transversal en fronteras de grano que muestra ataque por corrosión intergranular adyacente a las fronteras de grano.

Si un acero inoxidable austenítico con 18% Cr-8% Ni contiene más de 0.02% en peso de carbón, los carburos de cromo ($Cr_{23}C_6$) pueden precipitar en las fronteras de grano de la aleación si se calientan en el intervalo de 500 a 800°C durante un periodo suficientemente largo. El tipo 304 es un acero inoxidable austenítico con 18% Cr-8% Ni y alrededor de 0.06 y 0.08% en peso de carbón. Por lo tanto, esta aleación, si se calienta bastante tiempo en el intervalo de 500 a 800°C, se pondrá en la condición de sensibilización y será susceptible a la corrosión intergranular. Cuando los carburos de cromo se forman en las fronteras de grano, agotan las regiones adyacentes a las fronteras del cromo de modo que el nivel de este último en estas áreas disminuye por abajo del nivel de 12 por ciento de cromo necesario para el comportamiento pasivado o "inoxidable". Por lo tanto, cuando, por ejemplo, el acero inoxidable tipo 304 en la condición sensibilizada se expone a un ambiente corrosivo, las regiones cercanas a las fronteras de grano serán atacadas severamente. Estas áreas se vuelven anódicas para el resto de los cuerpos de grano, los cuales son catódicos creándose así pares galvánicos. La figura 13.24*b* muestra lo anterior de manera esquemática.

La falla de soldaduras hechas con acero inoxidable del tipo 304 o aleaciones similares pueden ocurrir mediante el mismo mecanismo de precipitación de los carburos de cromo como ya se describió. Este tipo de falla de soldadura se denomina **degeneración de la soldadura** y se caracteriza por una zona de deterioro de la soldadura eliminada en cierto grado de la línea central de la soldadura, como se muestra en la figura 13.25. El metal en la zona de degeneración de la soldadura se mantuvo en un intervalo de temperatura de sensibilización (500 a 800°C) durante demasiado tiempo de modo que los carburos de cromo se precipitaron en las fronteras de grano de las zonas

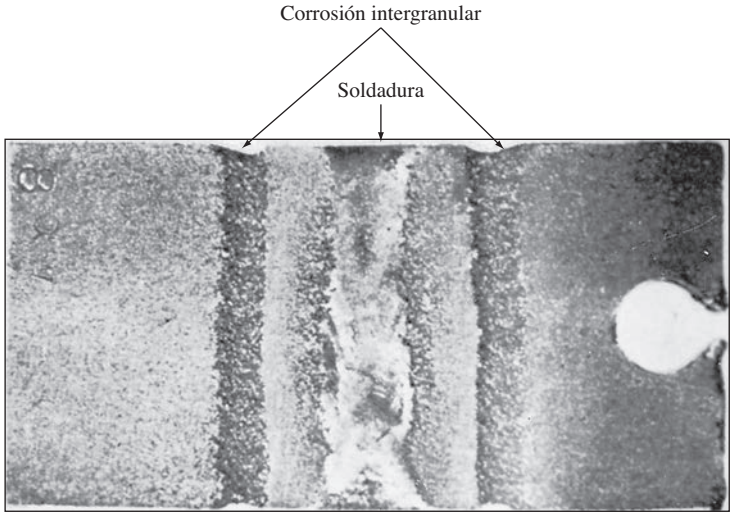


Figura 13.25
Corrosión intergranular de una soldadura de acero inoxidable. Las zonas de decaimiento de la soldadura se han mantenido en un intervalo de temperatura crítico necesario para la precipitación de carburos de cromo durante el enfriamiento.
(Tomado de H. H. Uhlig. "Corrosion and Corrosion Control," Wiley, 1963, p. 267.)

de la soldadura afectadas por el calor. Si una unión soldada en la condición de sensibilización no se vuelve a calentar subsecuentemente para redisolver a los carburos de cromo, estará expuesta a la corrosión intergranular cuando se exponga a un ambiente corrosivo, y la soldadura podría fallar.

La corrosión intergranular de los aceros inoxidables austeníticos puede controlarse mediante los siguientes métodos:

1. Utilizar un tratamiento térmico mediante una solución de alta temperatura después de la soldadura. Mediante el calentamiento de la unión soldada en un intervalo de 500 a 800°C seguido del templado con agua, los carburos de cromo pueden redisolverse y volver a la solución sólida.

2. Agregar un elemento que se combine con el carbón en el acero de manera que no puedan formarse los carburos de cromo. En las aleaciones tipo 347 y 321 se utilizan, respectivamente, pequeñas cantidades de colombio y de titanio. Estos elementos tienen mayor afinidad para el carbón que para el cromo. Se dice que las aleaciones con trazas de Ti o Cb están en la *condición estabilizada*.

3. Disminuir el contenido de carbón a casi 0.03% en peso o menos de modo que no puedan precipitarse cantidades importantes de carburos de cromo. El acero inoxidable tipo 304L, por ejemplo, tiene su carbón en un nivel tan bajo como el señalado.

13.5.6 Corrosión por esfuerzo

Las grietas debidas a la **corrosión por esfuerzo** (GCE) de los metales se refieren a las grietas provocadas por los efectos combinados de esfuerzos por tensión y un ambiente de corrosión específico que actúa sobre el metal. Durante las GCE la superficie del metal suele ser atacada muy poco mientras las grietas localizadas se propagan a través de la sección metálica, como se muestra, por ejemplo, en la figura 13.26. Los esfuerzos que ocasionan las GCE pueden ser residuales o aplicados. Los esfuerzos residuales altos que causan las GCE pueden ser el resultado, por ejemplo, de los esfuerzos térmicos generados por las velocidades de enfriamiento desiguales, de un mal diseño mecánico para los esfuerzos, de las transformaciones de fase durante el tratamiento térmico, del trabajo en frío y de la soldadura.

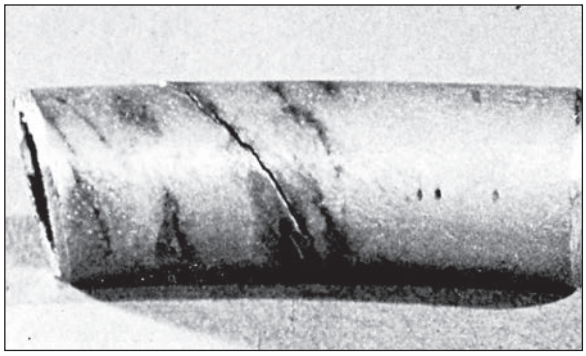


Figura 13.26
Grietas por corrosión por esfuerzo en un tubo.
(Cortesía de LaQue Center for Corrosion Technology, Inc.)

Tabla 13.7 Ambientes que pueden causar corrosión por esfuerzos de metales y aleaciones

Material	Ambiente	Material	Ambiente
Aleaciones de aluminio	Soluciones de NaCl-H_2O_2 Soluciones de NaCl Agua de mar Aire, vapor de agua	Aceros ordinarios	Soluciones de NaOH Soluciones de NaOH-Na_2SiO_3 Calcio, amoniaco y soluciones de nitrato de sodio Ácidos mezclados (H_2SO_4-HNO_2)
Aleaciones de cobre	Vapores y soluciones de amoniaco Aminas Agua, vapor de agua		
Aleaciones de oro	Soluciones de $FeCl_2$ Soluciones ácido acético-sal		Soluciones de HCN Soluciones de H_2S ácidas
Inconel	Soluciones de sosa caústica		Agua de mar
Plomo	Soluciones de acetato de plomo		Aleaciones de Na-Pb fundidas
Aleaciones de magnesio	Soluciones de NaCl-K_2CrO_4 Atmósferas rural y costera Agua destilada	Aceros inoxidables	Soluciones de cloruros ácidos tales como $MgCl_2$ y $BaCl_2$
Monel	Sosa caústica fundida Ácido fluorhídrico Ácido hidrofluosilícico		Soluciones de NaCl-H_2O_2 Agua de mar H_2S
Níquel	Sosa cáustica fundida		Soluciones de NaOH-H_2S Vapor de condensación de aguas cloradas
		Aleaciones de titanio	Ácido nítrico humeante rojo, agua de mar, N_2O_4, metanol-HCl

Fuente M. G. Fontana y N. D. Greene, *Corrosion Engineering*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1978, p. 100.

Sólo ciertas combinaciones entre las aleaciones y los ambientes provocarán la GCE. La tabla 13.7 da una lista de algunos de los sistemas aleación-ambiente en los cuales ocurren las GCE. No parece existir un patrón general para los ambientes que producen GCE en las aleaciones. Por ejemplo, los aceros inoxidables se agrietan en ambientes de cloruros pero no en los que contienen amoniaco. En contraste, los latones (aleaciones de Cu-Zn) se agrietan en los ambientes que contienen amoniaco pero no en los que contienen cloruros. Continuamente se discubren nuevas combinaciones de aleaciones-ambientes que ocasionan las GCE.

Mecanismo del agrietamiento debido a la corrosión por esfuerzos Los mecanismos que intervienen en las GCE no se entienden del todo puesto que existen tantos sistemas de aleación-ambiente que involucran a una gran cantidad de mecanismos diferentes. La mayoría de los mecanismos de las GCE incluyen las etapas de iniciación y propagación de las grietas. En muchos casos la grieta se inicia en una picadura o en otra discontinuidad sobre la superficie metálica. Después que se inició la grieta, su extremo puede avanzar como se muestra en la figura 13.27. Se genera un alto esfuerzo el extremo de la grieta debido a los esfuerzos por tensión que actúan sobre el metal. La disolución anódica del metal se produce por la corrosión electroquímica localizada en el extremo de la grieta conforme ésta avanza. La grieta crece en un plano perpendicular al esfuerzo por tensión hasta que el metal se frac-

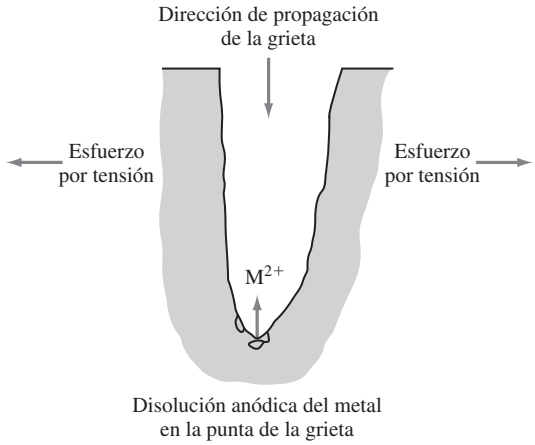


Figura 13.27
Formación de una grieta por corrosión por esfuerzos en un metal mediante disolución anódica.
(Tomado de R. W. Staehle.)

tura. Si el esfuerzo o la corrosión se interrumpen, la grieta deja de crecer. Priest *et al*.,[8] realizaron un experimento clásico, en el que demostraron que una grieta avanzada podría interrumpirse mediante la protección catódica. Cuando se quitó la protección catódica, la grieta empezó a crecer de nuevo.

El esfuerzo por tensión es necesario tanto para la iniciación como para la propagación de grietas y es importante en la ruptura de películas superficiales. La reducción del nivel de esfuerzo aumenta el tiempo necesario para que se dé el agrietamiento. La temperatura y el ambiente también son factores importantes para la formación de las grietas por corrosión debida a esfuerzos.

Protección contra el agrietamiento ocasionado por la corrosión por esfuerzos Puesto que los mecanismos de las GCE no se entienden por completo, los métodos para prevenirla son generales y empíricos. Uno o más de los siguientes métodos evitará o reducirá las GCE en metales.

1. Reducir los esfuerzos en la aleación por abajo del nivel que produzca grietas. Lo anterior puede hacerse si se disminuye la tensión sobre la aleación o proporcionando el material un recocido para relajar los esfuerzos. Es posible liberar los esfuerzos en los aceros al carbón simples calentándolos a 600-650°C (1 100 a 1 200°F), y en los aceros inoxidables austeníticos calentándolos en el intervalo de 815 a 925°C (1 500 a 1 700°F).

2. Eliminar el ambiente que ocasiona deterioro.

3. Cambiar la aleación si no es posible cambiar el ambiente o el nivel de esfuerzos. Por ejemplo, utilizar titanio en vez de acero inoxidable para los intercambiadores de calor que estén en contacto con agua de mar.

[8] D. K. Priest, F. H. Beck y M. G. Fontana, *Trans. ASM*, **47:**473 (1955).

4. Aplicar protección catódica utilizando ánodos consumibles o un suministro externo de corriente (véase la sección 13.7).

5. Si es posible añadir inhibidores.

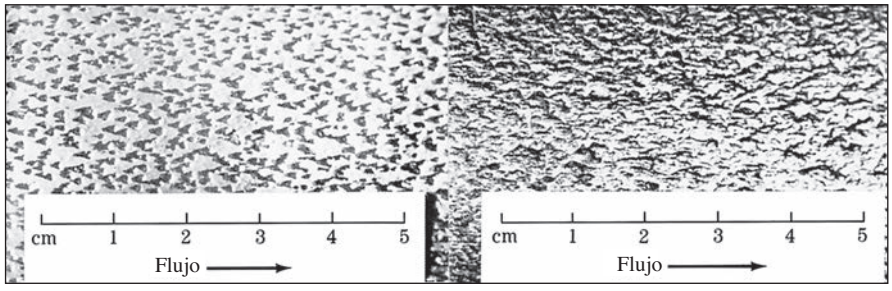
13.5.7 Corrosión por erosión

La *corrosión por erosión* puede definirse como la aceleración en la velocidad del ataque corrosivo a un metal debido al movimiento relativo de un fluido corrosivo y de la superficie metálica. Cuando el movimiento relativo del fluido corrosivo es rápido, los efectos del desgaste y la abrasión mecánicos pueden ser severos. La corrosión por erosión se caracteriza por la aparición en la superficie metálica de huecos, valles, picaduras, hoyos redondeados y otras configuraciones de daño de la superficie metálica que suelen ocurrir en la dirección del flujo del fluido corrosivo.

Los estudios de la acción de la corrosión por erosión de lechadas de arenas de sílice en tubería de acero blando han llevado a los investigadores a creer que la velocidad de corrosión incrementada de la acción de la lechada se debe a la eliminación del óxido superficial y de las películas de sal por acción abrasiva de las partículas de sílice de la lechada, lo que permite en consecuencia un acceso mucho más fácil del oxígeno disuelto a la superficie que se corroe. La figura 13.28 muestra patrones de desgaste severo causados por la corrosión por erosión de una sección experimental de tubería de acero blando.

13.5.8 Daño por cavitación

Este tipo de corrosión por erosión resulta de la formación y el colapso de las burbujas de aire o de las cavidades llenas de vapor en un líquido cerca de una superficie metálica. El daño por cavitación ocurre en superficies metálicas donde existen un flujo de líquido de alta velocidad y cambios de presión como los que se encuentran en los impulsores de bombas y en las hélices de barco. Los cálculos indican que el rápido colapso de las burbujas de vapor puede producir presiones localizadas tan altas como 60 000 psi. Con repetidos colapsos de las burbujas de vapor es posible producir con-



a) *b*)

Figura 13.28
Patrón de desgaste por corrosión por erosión de una lechada de sílice en tubo de acero blando, en la que se muestra *a*) Picaduras después de 21 días y *b*) un patrón ondulante regular después de 42 días. La velocidad de la lechada es de 3.5 m/s. *[Tomado de J. Postlethwaite et al., Corrosion,* **34:***245(1978).]*

siderables daños a la superficie metálica. Al remover las películas superficiales y al quitar las partículas metálicas de la superficie metálica, el daño por cavitación quizá aumente las velocidades de corrosión y produzca el desgaste de la superficie.

13.5.9 Corrosión por desgaste

Ocurre en interfaces entre materiales bajo carga expuestos a vibración y deslizamiento. La corrosión por desgaste aparece como huecos o picaduras rodeados por productos de corrosión. En el caso de la corrosión por desgaste de metales, los fragmentos metálicos entre las superficies en frotamiento se oxidan y algunas películas de óxido se desprenden por la acción de desgaste. En consecuencia, hay una acumulación de partícula de óxido que actúa como un abrasivo entre las superficies en frotamiento. La corrosión por desgaste ocurre comúnmente entre superficies en contacto rígido tales como las que se encuentran entre ejes y cojinetes o camisas. La figura 13.29 muestra los efectos de corrosión por desgaste en la superficie de una aleación de Ti-6 Al-4 V.

13.5.10 Fugas selectivas

Las **fugas selectivas** corresponden a la eliminación preferencial de un elemento de una aleación sólida mediante un proceso de corrosión. El ejemplo más común de este tipo de corrosión es la deszinificación, en la cual ocurre la fuga selectiva de zinc a partir de cobre en latones. También se producen procesos similares en otros sistemas de aleaciones tales como las pérdidas de níquel, estaño y cromo a partir de aleaciones de cobre, hierro de hierro fundido, níquel de aleaciones de acero, y cobalto a partir de estelita.

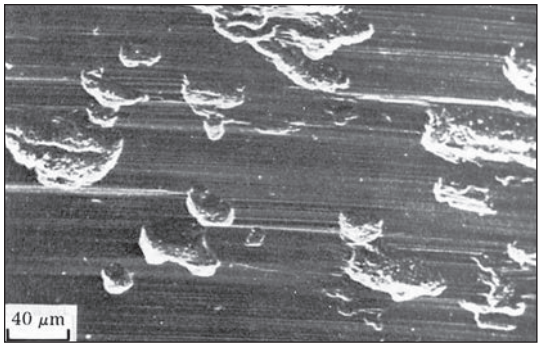


Figura 13.29
Micrografía de electrones escaneados que muestra corrosión por desgaste sobre la superficie de una aleación de Ti-6 a Al-4 que se produjo a 600°C utilizando una configuración de esfera sobre plano con 40 μm de amplitud de deslizamiento y después de 3.5×10^6 ciclos. *[Tomado de M. M. Handy and R. B. Waterhouse, Wear,* **71:***237(1981).]*

En la deszinificación de un latón de 70% Cu-30% Zn, por ejemplo, el zinc se remueve preferencialmente del latón, dejando una matriz de cobre débil y esponjosa. El mecanismo de deszinificación implica los siguientes tres pasos:[9]

1. El cobre y el zinc se disuelven mediante una solución acuosa.
2. Se redepositan iones de cobre sobre el latón.
3. Permanecen iones de zinc en la solución.

Puesto que el cobre que queda no tiene la resistencia de latón, se reduce de manera considerable la resistencia de la aleación.

La deszinificación puede minimizarse o evitarse cambiando a un latón con menor contenido de zinc (esto es, latón de 85% Cu-15% Zn) o a un cobre-níquel (70 a 90% Cu-10 para 30% Ni). Otras posibilidades consisten en cambiar el ambiente corrosivo o en utilizar protección catódica.

13.5.11 Daño por hidrógeno

El daño por hidrógeno se refiere a aquellas situaciones en las que la capacidad de carga de un componente metálico se reduce debido a la interacción con el hidrógeno atómico (H) o el hidrógeno molecular (H_2), casi siempre junto con esfuerzos por tensión residuales o aplicados externamente. Debido a la disponibilidad de hidrógeno, como uno de los elementos más abundantes, su interacción con metales puede ocurrir durante la producción, procesamiento o servicio y en una amplia variedad de ambientes y circunstancias. Muchos metales tales como los aceros blandos y aleados, aceros inoxidables martensíticos y endurecidos por precipitación, aleaciones de aluminio y aleaciones de titanio son susceptibles al daño por hidrógeno a diversos grados. Los efectos del daño por hidrógeno es posible que se manifiesten de varias maneras, entre las que se incluyen la formación de grietas, ampollas, formaciones hidrogenadas y ductibilidad reducida del material. De los numerosos tipos de daño por hidrógeno tres se relacionan directamente con la pérdida de ductibilidad y por ello se conocen como **fragilización por hidrógeno**. Éstos incluyen: 1) fragilización por ambiente de hidrógeno, el cual ocurre durante la deformación plástica de metales como aceros, aceros inoxidables y aleaciones de titanio en la presencia de gases que incluyen hidrógeno (H_2) o reacciones de corrosión; 2) agretamientos por esfuerzos por hidrógeno, que se define como una fractura por fragilización de un material en principio dúctil tal como carbón y aceros de baja aleación en la presencia de hidrógeno y bajo carga continua; 3) pérdida en la ductibilidad por tensión, en la cual se observa una reducción importante tanto en la capacidad de elongación como en el área en metales tales como aceros y aleaciones de aluminio. Ejemplos de otros tipos de daño por hidrógeno que no se clasifican directamente como fragilización por hidrógeno son: 1) ataque por hidrógeno, un modo de ataque a alta temperatura en el cual entra hidrógeno a metales como los aceros y reacciona con el carbón (disponible como solución sólida en forma de carburo) para producir gas metano que origina la formación de grietas o la descarburización; 2) fragilización, que ocurre cuando el hidrógeno atómico (H) se difunde hacia los defectos internos disponibles en aleaciones de baja resistencia de acero, cobre y aluminio y se precipita como hidrógeno molecular. El gas precipitado produce alta presión interna que da lugar a la deformación plástica local y a la fragilización que a menudo termina en una ruptura.

[9] Tomado de M. G. Fontana y N. D. Greene, "Corrosion Engineering", 2a. ed., McGraw-Hill, 1978.

La difusión de hidrógeno en metales podría ocurrir cuando se produzca corrosión y la reacción parcial catódica sea la reducción de los iones hidrógeno. También podría ocurrir cuando el metal se expone a agua normal o a agua de mar, a sulfuro de hidrógeno (lo que sucede con frecuencia durante la perforación de pozos petroleros y de gas) y en los procesos de baño químico y electrodepositación. En el proceso de baño químico, los óxidos superficiales (incrustaciones) se eliminan del hierro y el acero a través de la inmersión en ácidos sulfúrico (H_2SO_4) e clorhídrico (HCl).

El daño por hidrógeno es un problema serio y causa de muchas fallas en diversas componentes. De tal modo, un diseñador debe estar consciente de este tipo de daño y de los metales que son más susceptibles al mismo. Para revertir la contaminación por hidrógeno, se aplica al componente un proceso conocido como horneado (un proceso de tratamiento térmico) que promueve la difusión de hidrógeno fuera del metal.

13.6 OXIDACIÓN DE METALES

Hasta ahora la atención se ha centrado en las condiciones de corrosión en las cuales un electrolito líquido era parte integral del mecanismo de corrosión. Sin embargo, los metales y las aleaciones también reaccionan con el aire para formar óxidos externos. La oxidación de metales a alta temperatura es en particular importante en el diseño de ingeniería de turbinas de gas, motores de cohetes y equipo petroquímico de altas temperaturas.

13.6.1 Películas de óxido protectoras

El grado al cual una película de óxido protege a un metal depende de muchos factores, de los cuales los siguientes son importantes:

1. El cociente en volumen entre el óxido y el metal después de la oxidación debe acercarse a 1:1.
2. La película debe tener buena adherencia.
3. El punto de fusión del óxido debe ser alto.
4. La película de óxido debe tener baja presión de vapor.
5. La película de óxido debe tener un coeficiente de expansión casi igual al del metal.
6. La película debe tener plasticidad de alta temperatura para evitar fracturas.
7. La película debe tener coeficientes de baja conductividad y baja difusión de iones metálicos y oxígeno.

El cálculo del cociente en volumen del óxido y el metal después de la oxidación es un primer paso que puede tomarse para determinar si un óxido y un metal podría ser un protector. Este cociente recibe el nombre de **cociente de Pilling-Bedworth[10] (P.B.)** y puede expresarse en forma de ecuación como

$$\text{Cociente P.B.} = \frac{\text{volumen de óxido producido por la oxidación}}{\text{volumen de metal consumido por la oxidación}} \qquad \textbf{(13.20)}$$

Si el metal tiene un cociente P.B. menor que 1, como en el caso de los metales alcalinos (por ejemplo, el Na tiene un cociente P.B. de 0.576), el óxido metálico será po-

[10] N. B. Pilling y R. E. Bedworth, *J. Inst. Met.,* **29:**529 (1923).

roso y no protector. Si el cociente P.B. es mayor que 1, como en el caso de Fe (Fe_2O_3 tiene un cociente P.B. de 2.15), estarán presentes esfuerzos compresivos y el óxido tenderá a agrietarse y desmoronarse. Si el cociente P.B. es cercano a 1, el óxido quizá sea protector, aunque es necesario que se cumplan los demás factores señalados antes. De tal modo, el cociente P.B. no determina sólo si un óxido es protector. El problema de ejemplo 13.9 muestra cómo se calcula el cociente P.B. para el aluminio.

PROBLEMA DE EJEMPLO 13.9

Calcule el cociente entre el volumen de óxido y el volumen de metal (cociente de Pilling-Bedworth) para la oxidación de aluminio en óxido de aluminio, Al_2O_3. La densidad de aluminio = 2.70 g/cm^3 y la del óxido de aluminio = 3.70 g/cm^3

■ **Solución**

$$\text{Cociente P.B.} = \frac{\text{volumen de óxido producido por la oxidación}}{\text{volumen de metal consumido por la oxidación}} \qquad \textbf{(13.20)}$$

Suponiendo que se oxidan 100 g de aluminio,

$$\text{Volumen de aluminio} = \frac{\text{masa}}{\text{densidad}} = \frac{100\text{ g}}{2.70\text{ g/cm}^3} = 37.0\text{ cm}^3$$

Para encontrar el volumen del Al_2O_3 asociado con la oxidación de 100 g de Al, se determina primero la masa de Al_2O_3 producida por la oxidación de 100 g de Al, utilizando la ecuación siguiente:

$$\begin{array}{ccc} & 100\text{ g} & X\text{ g} \\ & 4Al + 3O_2 \rightarrow & 2Al_2O_3 \\ 4 \times \dfrac{26.98\text{ g}}{\text{mol}} & & 2 \times \dfrac{102.0\text{ g}}{\text{mol}} \end{array}$$

o

$$\frac{100\text{ g}}{4 \times 26.98} = \frac{X\text{ g}}{2 \times 102}$$

$$X = 189.0\text{ g } Al_2O_3$$

Después se determina el volumen asociado con los 189.0 g de Al_2O_3 utilizando la relación volumen = masa/densidad. Por lo tanto,

$$\text{Volumen de } Al_2O_3 = \frac{\text{masa de } Al_2O_3}{\text{densidad de } Al_2O_3} = \frac{189.0\text{ g}}{3.70\text{ g/cm}^3} = 51.1\text{ cm}^3$$

De tal modo,

$$\text{Cociente P.B.} = \frac{\text{volumen de } Al_2O_3}{\text{volumen de Al}} = \frac{51.1\text{ cm}^3}{37.0\text{ cm}^3} = 1.38 \blacktriangleleft$$

Comentario:
El cociente 1.38 es cercano a 1, por lo que Al_2O_3 tiene un cociente P.B. favorable para ser un óxido protector. El Al_2O_3 es un óxido protector porque forma una película coherente y firme sobre el aluminio. Algunas de las moléculas de Al_2O_3 en la interfaz óxido-metal penetran en el metal aluminio y viceversa.

13.6.2 Mecanismo de oxidación

Cuando una película de óxido se forma sobre un metal por la oxidación de un metal por medio de oxígeno gaseoso, ésta se forma a partir de un proceso electroquímico y no simplemente por la combinación química de un metal y oxígeno como $M + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow MO$. Las reacciones parciales de oxidación y reducción para la formación de iones divalentes son

$$\text{Reacción parcial de oxidación:} \quad M \rightarrow M^{2+} + 2e^- \qquad \textbf{(13.21}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

$$\text{Reacción parcial de reducción:} \quad \tfrac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-} \qquad \textbf{(13.21}\boldsymbol{b}\textbf{)}$$

En las etapas muy iniciales de la oxidación, la capa de óxido es discontinua y se inicia por la extensión lateral de núcleos de óxidos discretos. Después de que los núcleos se entrelazan, el transporte de masa de los iones ocurre en una dirección normal a la superficie (figura 13.30). En la mayoría de los casos el metal se difunde como cationes y electrones a través de la película de óxido, como se indica en la figura 13.30*a*. En este mecanismo el oxígeno se reduce a iones de oxígeno en la interfaz óxido-gas, y la zona de formación de óxido se encuentra en esta superficie (difusión de cationes). En algunos otros casos, por ejemplo, en algunos óxidos metálicos pesados, es posible que el oxígeno se difunda como iones O^{2-} hacia la interfaz metal-óxido y los electrones lo hagan hacia la interfaz óxido-gas, como se indica en la figura 13.30*b*. En este caso el óxido se forma en la interfaz metal-óxido (figura 13.30*b*). Ésta es una difusión de aniones. Los movimientos de óxido que se indican en la figura 13.30 se determinan principalmente por los movimientos de los marcadores inertes en la interfaz óxido-gas. En el caso de la difusión de cationes los marcadores se entierran en el óxido, en

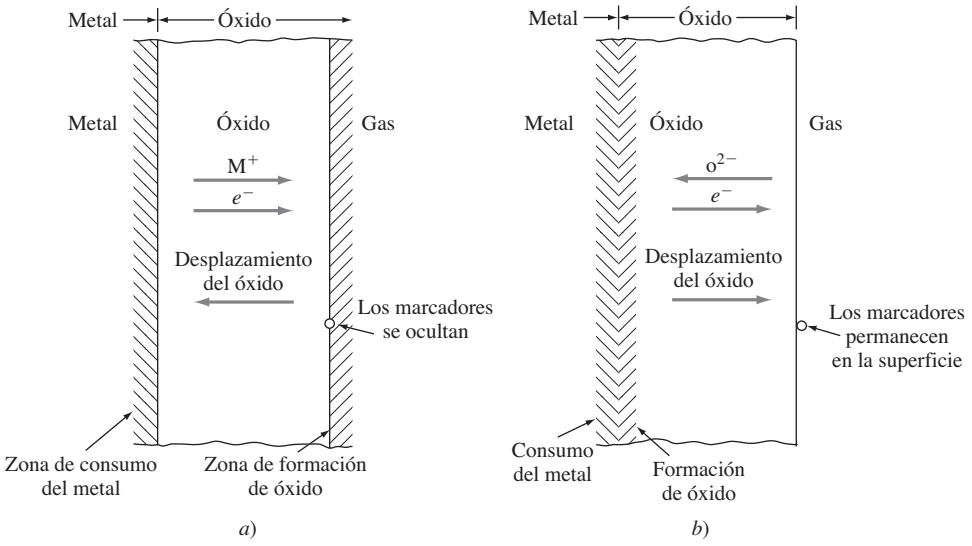


Figura 13.30
Oxidación de superficies planas de metales. *a*) Cuando se difunden los cationes, el óxido que se forma inicialmente se desplaza hacia el metal. *b*) Cuando se difunden los aniones, el óxido se desplaza en la dirección opuesta.
[Tomado de L. L. Shreir (ed.) "Corrosion," vol. 1, 2a. ed., Newnes-Butterworth, 1976, p. 1:242.]

tanto que en el caso de la difusión de aniones los marcadores permanecen en la superficie del mismo.

Los mecanismos detallados de la oxidación de metales y aleaciones pueden ser muy complejos, en particular cuando se producen capas de diferente composición y estructuras de defectos. El hierro, por ejemplo, cuando se oxida a elevadas temperaturas, forma una serie de óxidos de hierro: FeO, Fe_3O_4 y Fe_2O_3. La oxidación de aleaciones se complica aún más por la interacción de los elementos aleantes.

13.6.3 Velocidades de oxidación (cinética)

Desde el punto de vista de la ingeniería, la velocidad a la cual se oxidan los metales y aleaciones es muy importante puesto que la velocidad de oxidación de muchos metales y aleaciones determina la vida útil del equipo. La velocidad de oxidación de metales y aleaciones suele medirse y expresarse como el peso ganado por unidad de área. Durante la oxidación de diferentes metales, se han observado varias leyes de velocidad empíricas; algunas de las comunes se presentan en la figura 13.31.

La velocidad de oxidación más simple cumple la ley lineal

$$w = k_L t \tag{13.22}$$

donde w = peso ganado por unidad de área
t = tiempo
k_L = constante de velocidad lineal

El comportamiento lineal de la oxidación se muestra mediante metales que tienen películas de óxido porosas o agrietadas, y por ello el tranporte de los iones reactantes ocurre a velocidades más rápidas que la reacción química. Ejemplos de metales que se oxidan linealmente son el potasio, que tiene un cociente en volumen óxido-metal de 0.45, y el tantalio, con un cociente de 2.50.

Cuando la difusión de iones es la etapa que controla la oxidación de metales, los metales puros deben seguir la relación parabólica

$$w^2 = k_p t + C \tag{13.23}$$

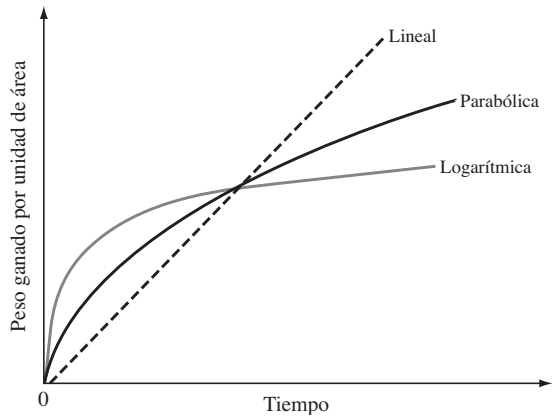


Figura 13.31
Leyes de velocidad de oxidación.

donde w = ganancia en peso por unidad de área
t = tiempo
k_p = constante de velocidad parabólica
C = una constante

Muchos metales se oxidan de acuerdo con la ley de velocidad parabólica, y éstos suelen asociarse con óxidos coherentes gruesos. El hierro, el cobre y el cobalto son ejemplos de metales que muestran comportamiento de oxidación parabólica.

Algunos metales como Al, Cu y Fe se oxidan a temperaturas ambiente o ligeramente altas para formar películas delgadas que cumplen con la ley de velocidad logarítmica.

$$w = k_e \log(Ct + A) \tag{13.24}$$

donde C y A son constantes y k_e es la constante de velocidad logarítmica. Estos metales cuando se exponen al oxígeno a temperatura ambiente se oxidan muy rápido al principio, pero luego de unos cuantos días de exposición, la velocidad disminuye a un valor muy bajo.

Algunos metales que exhiben comportamiento de velocidad lineal tienden a oxidarse catastróficamente a altas temperaturas debido a rápidas reacciones exotérmicas en sus superficies. Por tanto, en su superficie ocurre una reacción en cadena que causa que aumenten la temperatura y la velocidad de la reacción. Metales como el molibdeno, tungsteno y vanadio que tiene óxidos volátiles es posible que se oxiden de manera catastrófica. Además, las aleaciones que contienen molibdeno y vanadio inclusive en pequeñas cantidades presentan con frecuencia oxidación catastrófica que limita su uso en atmósferas oxidantes de alta temperatura. La adición de grandes cantidades de cromo y níquel a aleaciones de hierro mejora su resistencia a la oxidación y retarda los efectos de la oxidación catastrófica debida a algunos otros elementos.

PROBLEMA DE EJEMPLO 13.10

Una muestra de 1 cm^2 de 99.94% en peso de níquel, grosor de 0.75 mm, se oxida en oxígeno a una presión de 1 atm y 600°C. Después de 2 h, la muestra presenta una ganancia en peso de 70 $\mu g/cm^2$. Si este material muestra un comportamiento de oxidación parabólica, ¿cuál será la ganancia en peso después de 10 h? (Utilice la ecuación 13.23 con $C = 0$.)

■ Solución

Primero, es necesario determinar la constante de velocidad parabólica k_p a partir de la ecuación de la velocidad de oxidación parabólica $y^2 = k_p t$, donde y es el grosor del óxido producido en el tiempo t. Como la ganancia en peso de la muestra durante oxidación es proporcional al crecimiento en espesor de óxido y puede medirse con mayor precisión, se sustuirá y, el espesor de óxido, por x, la ganancia en peso por área unitaria de la muestra durante la oxidación. De tal manera, $x^2 = k'_p t$ y

$$k'_p = \frac{x^2}{t} = \frac{(70\ \mu g/cm^2)^2}{2\ h} = 2.45 \times 10^3\ \mu g^2/(cm^4 \cdot h)$$

Para el tiempo $t = 10$ h, la ganancia en peso en microgramos por centímetro cuadrado es

$$x = \sqrt{k'_p t} = \sqrt{[2.45 \times 10^3\ (\mu g^2/(cm^4 \cdot h))](10\ h)}$$
$$= 156\ \mu g/cm^2 \blacktriangleleft$$

13.7 CONTROL DE LA CORROSIÓN

La corrosión puede controlarse o prevenirse mediante diferentes métodos. Desde el punto de vista industrial, la economía de la situación suele determinar el método utilizado. Por ejemplo, un ingeniero quizá tenga que determinar si es más económico sustituir periódicamente cierto equipo o fabricarlo con materiales que son sumamente resistentes a la corrosión pero más caros para que sean más durables. Algunos de los métodos de control de corrosión comunes se muestran en la figura 13.32.

13.7.1 Selección de materiales

Materiales metálicos Uno de los métodos más comunes para el control de la corrosión consiste en utilizar materiales resistentes a la misma en un ambiente específico. Cuando se eligen materiales en un diseño de ingeniería para el cual es importante la resistencia a la corrosión, es necesario consultar manuales y datos de corrosión para verificar que se utilice los materiales adecuados. Una consulta adicional con expertos en corrosión de las compañías que producen los materiales también sería útil para verificar las mejores selecciones.

Sin embargo, existen algunas reglas generales que son razonablemente exactas y que pueden aplicarse cuando se eligen metales y aleaciones resistentes a la corrosión en aplicaciones de ingeniería. Éstas son:[11]

1. En condiciones reductoras y no oxidantes como los ácidos sin aire y las soluciones acuosas, se recurre a menudo a aleaciones de níquel y cobre.

2. En condiciones oxidantes, se emplean aleaciones que contienen cromo.

3. En condiciones de oxidación extremadamente fuertes, es común que se utilicen titanio y sus aleaciones.

Algunas de las combinaciones metal "natural" —ambiente corrosivo que proporciona buena resistencia a la corrosión a bajo costo se listan en la tabla 13.8.

El acero inoxidable es un material que con frecuencia utilizan incorrectamente los fabricantes que no están familiarizados con las propiedades de corrosión de los meta-

[11] Tomado de M. G. Fontana y N. D. Greene, "Corrosion Engineering", 2a. ed., McGraw-Hill, 1978.

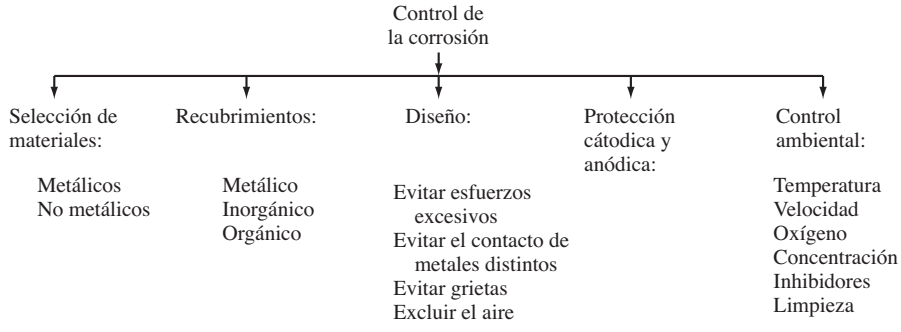


Figura 13.32
Métodos comunes de control de la corrosión.

Tabla 13.8 Combinaciones de metales y ambientes que proporcionan buena resistencia a la corrosión por el costo

1.	Aceros inoxidables-ácido nítrico
2.	Níquel y aleaciones de níquel-cáustico
3.	Monel-ácido fluorhídrico
4.	Hastelloys (Chlorimets)-ácido clorhídrico caliente
5.	Plomo-ácido sulfúrico diluido
6.	Aluminio-exposición atmosférica no estancada
7.	Estaño-agua destilada
8.	Titanio, soluciones oxidantes fuertes y calientes
9.	Tantalio-resistencia última
10.	Acero-ácido sulfúrico concentrado

Fuente: M. G. Fontana y N. D. Greene, *Corrosion Engineering*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1978.

les. El acero inoxidable no es una aleación específica sino un término que se emplea para una gran clase de aceros con contenidos de cromo por arriba de 12 por ciento. Los aceros inoxidables se emplean comúnmente en ambientes corrosivos que son moderadamente oxidantes, por ejemplo, ácido nítrico. Sin embargo, los aceros inoxidables son menos resistentes a las soluciones que contienen cloruros y son más susceptibles a las grietas por corrosión por esfuerzos que el acero estructural común. De tal modo, es necesario tener sumo cuidado para cerciorarse que no se utilicen aceros inoxidables en aplicaciones para las que no son adecuados.

Materiales no metálicos Los *materiales poliméricos* como los plásticos y los hules son más débiles, suaves y, en general, menos resistentes a ácidos inorgánicos fuertes que las aleaciones y los metales, por lo que su uso es limitado como materiales primarios para la resistencia a la corrosión. Sin embargo, a medida que dispongan nuevos materiales plásticos de mayor resistencia, los materiales poliméricos se volverán más importantes. Los *materiales cerámicos* tienen excelente resistencia a la corrosión y a altas temperaturas, pero presentan la desventaja de ser quebradizos con bajos esfuerzos por tensión. Los materiales no metálicos se usan entonces principalmente en el control de la corrosión en forma de fundas, juntas y recubrimientos.

13.7.2 Recubrimientos

Los recubrimientos metálicos, inorgánicos y orgánicos, se aplican a metales para evitar o reducir la corrosión.

Recubrimientos metálicos Los recubrimientos metálicos que difieren del metal por proteger se aplican como capas delgadas para separar el ambiente corrosivo del metal. Los recubrimientos metálicos se aplican algunas veces de manera que puedan servir como ánodos de sacrificio que se corroan en vez del metal subyacente. Por ejemplo, el recubrimiento del zinc sobre acero para hacer acero galvanizado es anódico para el acero y se corroe de manera sacrificada.

Muchas partes metálicas se protegen mediante electrodepositación para producir una delgada capa protectora del metal. En este proceso la parte que se va a recubrir se hace del cátodo de una celda electrolítica. El electrolito es una solución de una sal de metal que se recubrirá, y se aplica corriente directa a la parte por recubrir y a otro electrodo. El recubrimiento de una capa delgada de estaño sobre la placa de acero para producir la placa de estaño que se utiliza para latas de este último material es un ejemplo

de la aplicación de este método. El recubrimiento también puede tener varias capas, como es el caso de la placa de cromo utilizada en automóviles. Este recubrimiento consta de tres capas: 1) un rocío interno de cobre para la adhesión del recubrimiento al acero, 2) una capa intermedia de níquel para una buena resistencia a la corrosión y 3) una delgada capa de cromo principalmente para el aspecto.

Algunas veces una delgada capa de metal se extiende sobre las superficies del metal por proteger. La delgada capa exterior del metal proporciona resistencia a la corrosión a su metal núcleo del interior. Por ejemplo, algunos aceros "se revisten" con una delgada capa de acero inoxidable. Este proceso de revestimiento también se utiliza para proporcionar ciertas aleaciones de aluminio de alta resistencia con una capa exterior resistente a la corrosión. Para estas aleaciones *Alclad*, que es como se conocen, una delgada capa de aluminio relativamente puro se extiende sobre la superficie exterior de la aleación del núcleo de alta resistencia.

Recubrimientos inorgánicos (cerámicas y vidrio) En algunas aplicaciones es deseable recubrir acero con un recubrimiento cerámico para obtener un acabado durable y liso. El acero se recubre por lo general con una cubierta de porcelana compuesta por una delgada capa de vidrio fundido a la superficie del acero de manera que se adhiera bien y tenga un coeficiente de expansión ajustado al metal de la base. En algunas industrias químicas se utilizan recipientes de acero con forro de vidrio debido a su facilidad de limpieza y resistencia a la corrosión.

Recubrimientos orgánicos Las pinturas, barnices, lacas y muchos otros materiales poliméricos orgánicos se utilizan comúnmente para proteger metales contra ambientes corrosivos. Estos materiales ofrecen barreras delgadas, resistentes y durables para proteger el metal del sustrato de ambientes corrosivos. De acuerdo con el peso, el uso de recubrimientos orgánicos protege más a los metales contra la corrosión que cualquier otro método. Sin embargo, es necesario elegir recubrimientos adecuados y aplicarlos de manera apropiada sobre superficies bien preparadas. En muchos casos el mal desempeño de las pinturas, por ejemplo, puede atribuirse a la incorrecta aplicación y a la preparación de las superficies. Es necesario tener cuidado de *no* aplicar recubrimientos orgánicos en casos donde el metal del sustrato podría ser atacado con rapidez si se agrieta la película del recubrimiento.

13.7.3 Diseño

El diseño de ingeniería adecuado de equipo puede ser tan importante en cuanto a la prevención de la corrosión como en lo relativo a la selección de los materiales adecuados. El diseñador de ingeniería debe considerar los materiales junto con los requerimientos necesarios de propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas. Todas estas consideraciones deben balancearse con las limitaciones económicas. Al diseñar un sistema los problemas de corrosión específicos quizá exijan el asesoramiento de expertos en corrosión. Sin embargo, a contiunación se presentan algunas reglas de diseño generales:[12]

1. Considerar la acción de la penetración de corrosión junto con los requisitos de resistencia mecánica cuando se considere el grosor del metal utilizado. Esto es en especial importante en tuberías y tanques que contienen líquidos.

[12] Tomado de M. G. Fontana y N. D. Greene, "*Corrosion Engineering*", 2a. ed., McGraw-Hill, 1978.

2. Soldar más bien que remachar los contenedores para disminuir la corrosión por grietas. Si se emplean remaches, elegir los que sean catódicos con respecto a los materiales que se les unan.
3. Si es posible, emplear metales galvánicamente similares en toda la estructura. Evitar metales distintos que puedan provocar corrosión galvánica. Si es necesario atornillar en conjunto metales galvánicamente disimilares, use juntas y arandelas no metálicas para evitar el contacto eléctrico entre los metales.
4. Evite los esfuerzos y las concentraciones de esfuerzos excesivos en ambientes corrosivos para evitar las grietas por corrosión por esfuerzo. Esto es importante en especial cuando se usan aceros inoxidables, latones y otros materiales susceptibles a las grietas por corrosión por esfuerzos en ciertos ambientes corrosivos.
5. Evite los dobleces pronunciados en sistemas de tuberías donde se presente flujo. Las áreas en las cuales cambia abruptamente la dirección del flujo promueven la corrosión por erosión.
6. Diseñe tanques y otros contenedores de fácil drenaje y limpieza. Los estancamientos de líquidos corrosivos generan celdas de concentración que promueven la corrosión.
7. Diseñe sistemas de fácil remoción y sustitución de piezas que se espera que fallarán rápidamente durante el servicio. Por ejemplo, las bombas en las plantas químicas deben sustuirse con facilidad.
8. Diseñe sistemas calefactores de manera que no ocurran puntos calientes. Por ejemplo, los intercambiadores de calor deben diseñarse para gradientes de temperatura uniformes.

En resumen, diseñe sistemas con condiciones lo más uniforme posibles y evite la heterogeneidad.

13.7.4 Alteración del ambiente

Las condiciones ambientales pueden ser muy importantes al determinar la severidad de la corrosión. Los métodos de mayor utilidad para reducir la corrosión mediante cambios ambientales son 1) disminuir la temperatura, 2) disminuir la velocidad de líquidos, 3) eliminar el oxígeno de líquidos, 4) reducir las concentraciones de iones y 5) agregar inhibidores a los electrolitos.

1. Reducir la temperatura de un sistema suele reducir la corrosión debido a las velocidades de reacción inferiores a temperaturas más bajas. Sin embargo, hay algunas excepciones en las que la situación es a la inversa. Por ejemplo, el agua de mar hirviente es menos corrosiva que el agua de mar caliente en virtud de la disminución de la solubilidad del oxígeno al aumentar la temperatura.
2. La disminución de velocidad de un fluido corrosivo reduce la corrosión por erosión. A pesar de eso, para metales y aleaciones que se pasivan, deben evitarse las soluciones estancadas.
3. La eliminación del oxígeno de las soluciones de agua algunas veces es útil en la reducción de la corrosión. Por ejemplo, el agua que se alimenta a las calderas se desaerea para reducir la corrosión. A pesar de eso, en sistemas que dependen del oxígeno para la pasivación, la desaereación es indeseable.
4. La reducción de la concentración de iones corrosivos en una solución que está corroyendo a un metal puede disminuir la velocidad de corrosión de este último. Por ejemplo, al disminuir la concentración de iones cloruro en una solución de agua se reducirá su ataque corrosivo sobre aceros inoxidables.

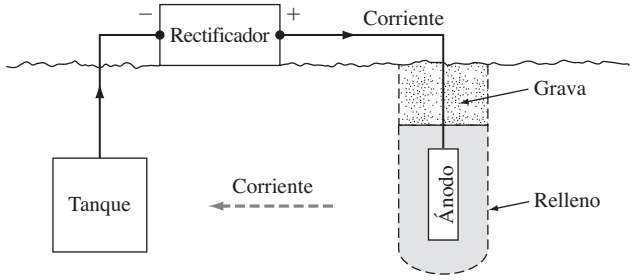


Figura 13.33
Protección catódica de un tanque subterráneo utilizando corrientes aplicadas.
(Según M. G. Fontana and N. D. Green, "Corrosion Engineering," 2a. ed., McGraw-Hill, 1978, p. 207.)

5. Si se sgregan *inhibidores* a un sistema puede disminuirse la corrosión. Los inhibidores son en esencia catalizadores de retardo. La mayoría de los inhibidores se han formulado mediante experimentos empíricos, y muchos tienen características propias. Sus acciones también varían de modo considerable. Por ejemplo, los inhibidores de *tipo absorción* se absorben en una superficie y forman una película protectora. Los de *tipo remoción* reaccionan para eliminar los agentes corrosivos de la solución tales como el oxígeno.

13.7.5 Protección anódica y catódica

Protección catódica El control de la corrosión puede lograrse mediante un método llamado **protección catódica**[13] en la cual los electrones se suministran a la estructura metálica por proteger. Por ejemplo, la corrosión de una estructura de acero en un ambiente ácido implica las siguientes ecuaciones electroquímicas:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$$
$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$

Si se suministran los electrones a la estructura de acero, la disolución (corrosión) metálica se suprimirá y aumentará la velocidad de evolución del hidrógeno. En consecuencia, si se suministran electrones continuamente a la estructura de acero, se suprimirá la corrosión. Los electrones para protección catódica puede suministrarse mediante 1) una fuente de potencia de CD externa, como se muestra en la figura 13.33, o mediante 2) un acoplamiento galvánico con un metal más anódico que el que se está protegiendo. La protección catódica de un tubo de acero mediante acoplamiento galvánico a un nodo de magnesio se ilustra en la figura 13.34. Los ánodos de magnesio que se corroen en lugar del metal que se protege se usan más comúnmente en la protección catódica debido a sus altos potencial negativo y densidad de corriente.

Protección anódica Es relativamente nueva y se basa en la formación de películas pasivas protectoras sobre superficies metálicas y de aleaciones aplicando exter-

[13] Para un interesante artículo acerca de la aplicación de protección catódica en la preservación de acero sumergido en el Golfo Arábigo, consulte R. N. Duncan y G. A. Haines, "Forty Years of Succesful Cathodic Protection on The Arabian Gulf," *Mater. Perform.,* **21:** 9 (1982).

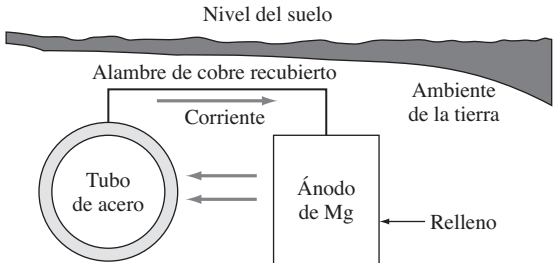


Figura 13.34
Protección de una tubería subterránea con un ánodo de magnesio.
(Tomado de M. G. Fontana y N. D. Greene, Corrosion Engineering, 2a. ed., McGraw-Hill, 1978, p. 207.)

namente corrientes anódicas. Es posible aplicar corrientes anódicas controladas con cuidado mediante un dispositivo llamado *potenciostato* para proteger metales que se pasivan, tales como los aceros inoxidables austeníticos, con el fin de hacerlos pasivos y en consecuencia reducir su velocidad de corrosión en un ambiente corrosivo.[14] Las ventajas de la protección anódica corresponden a que es posible aplicarla en condiciones de muy poco a muy corrosivas, ya que demandan corrientes aplicadas muy pequeñas. Una desventaja de la protección anódica es que se necesita instrumentación compleja y su costo de instalación es alto.

[14] S. J. Acello y N. D. Greene, *Corrosion,* **18:**286 (1962).

PROBLEMA DE EJEMPLO 13.11

Un ánodo de magnesio de sacrificio de 2.2 kg se une al casco de acero de un barco. Si el ánodo se corroe totalmente en 100 días ¿cuál es la corriente promedio producida por el ánodo en ese periodo?

■ Solución

El magnesio se corroe de acuerdo con la reacción $Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$. Se usará la ecuación 13.13 y se resolverá para I, la corriente de corrosión promedio en amperes:

$$w = \frac{ItM}{nF} \qquad \text{o} \qquad I = \frac{wnF}{tM}$$

$$w = 2.2\ \text{kg}\left(\frac{1\,000\ \text{g}}{\text{kg}}\right) = 2\,200\ \text{g} \qquad n = 2 \qquad F = 96\,500\ \text{A} \cdot \text{s/mol}$$

$$t = 100\ \text{días}\left(\frac{24\ \text{h}}{\text{día}}\right)\left(\frac{3\,600\ \text{s}}{\text{h}}\right) = 8.64 \times 10^6\ \text{s} \qquad M = 24.31\ \text{g/mol} \qquad I = ?\ \text{A}$$

$$I = \frac{(2\,200\ \text{g})(2)(96\,500\ \text{A} \cdot \text{s/mol})}{(8.64 \times 10^6\ \text{s})(24.31\ \text{g/mol})} = 2.02\ \text{A} \blacktriangleleft$$

13.8 RESUMEN

La corrosión puede definirse como el deterioro de un material que resulta del ataque químico de su ambiente. La mayor parte de la corrosión de materiales implica el ataque químico de metales mediante celdas electroquímicas. Si se estudian las condiciones de equilibrio, las tendencias de los metales puros a corroerse en un ambiente acuoso estándar pueden relacionarse con los potenciales de los electrodos estándar de los metales. Sin embargo, puesto que los sistemas que se corroen no están en equilibrio, la cinética de las reacciones de corrosión también debe estudiarse. Algunos ejemplos de los factores cinéticos que afectan las velocidades de las reacciones de corrosión son la polarización de las reacciones de corrosión y la formación de películas pasivas sobre los metales.

Existen muchos tipos de corrosión. Algunos de los importantes que se comentaron son: la de ataque uniforme o general, la galvánica o de dos metales, por picaduras, por grietas, la intergranular, por esfuerzo, por erosión, el daño por cavitación por desgaste, la fuga selectiva o desaleación y la fragilidad por hidrógeno.

La oxidación de metales y aleaciones también es importante en algunos diseños de ingeniería como las turbinas de gas, los motores de cohetes y las instalaciones petroquímicas de alta temperatura. El estudio de las velocidades de oxidación de metales en algunas aplicaciones es muy importante. A temperaturas altas, es necesario tener cuidado para evitar la oxidación catastrófica.

Es posible controlar o prevenir la corrosión mediante muchos métodos diferentes. Para evitarla, es necesario utilizar cuando sea factible materiales resistentes a la misma en un ambiente determinado. En muchos casos la corrosión puede evitarse mediante el uso de recubrimientos metálicos, inorgánicos u orgánicos. El diseño adecuado de equipo de ingeniería también puede ser muy importante en muchas situaciones. En algunos casos especiales, es posible controlar la corrosión utilizando sistemas de protección catódica o anódica.

13.9 DEFINICIONES

Sección 13.1

Corrosión: deterioro de un material producto del ataque químico de su ambiente.

Sección 13.2

Ánodo: electrodo metálico en una celda electrolítica que se disuelve como iones y suministra electrones al circuito externo.

Cátodo: el electrodo metálico en una celda electrolítica que acepta electrones.

Sección 13.3

Fuerza electromotriz en serie: arreglo de elementos metálicos de acuerdo con sus potenciales electroquímicos estándar.

Celda galvánica: dos metales distintos en contacto eléctrico con un electrolito.

Celda de concentración de iones: celda galvánica formada cuando dos pedazos del mismo metal se conectan eléctricamente mediante un electrolito pero que están en soluciones de diferentes concentraciones de iones.

Celda de concentración de oxígeno: celda galvánica formada cuando dos pedazos del mismo metal se conectan eléctricamente mediante un electrolito pero están en soluciones de diferente concentración de oxígeno.

Sección 13.4

Polarización catódica: retardamiento o interrumpción de reacciones catódicas en un cátodo de una celda electroquímica debido a 1) un paso lento en la secuencia de reacción en la

interfaz metal-electrolito (*polarización de activación*) o 2) falta de reactante o acumulación de productos de reacción en la interfaz metal-electrolito (*polarización de concentración*).

Pasivación: formación de una película de átomos o moléculas sobre la superficie de un ánodo de modo que la corrosión se retarda o interrumpe.

Serie galvánica (agua de mar): arreglo de elementos metálicos de acuerdo con sus potenciales electroquímicos en agua de mar con referencia a un electrodo estándar.

Sección 13.5

Corrosión por picaduras: ataque de corrosión local que resulta de la formación de pequeños ánodos en una superficie metálica.

Corrosión intergranular: corrosión preferencial que ocurre en fronteras de grano o en regiones adyacentes a las fronteras de grano.

Degeneración de la soldadura: ataque corrosivo en o adyacente a una soldadura como consecuencia de la acción galvánica que resulta de diferencias estructurales en la soldadura.

Corrosión por esfuerzo: ataque corrosivo preferencial de un metal expuesto a esfuerzo en un ambiente corrosivo.

Fuga selectiva: eliminación preferencial de un elemento de una aleación sólida mediante un proceso de corrosión.

Fragilización por hidrógeno: pérdida de ductibilidad en un metal debido a la interacción de elementos aleantes en el metal con hidrógeno atómico o molecular.

Fragilización: tipo de daño debido a la difusión de hidrógeno atómico dentro de los poros internos en un metal que crea alta presión interna y produce ruptura.

Sección 13.6

Cociente de Pilling-Bedworth (P.B.): cociente entre el volumen de óxido formado y el volumen del metal consumido por la oxidación.

Sección 13.7

Protección catódica: protección de un metal conectándolo a un ánodo de sacrificio o mediante la aplicación de un voltaje de cd para hacerlo un cátodo.

Protección anódica: protección de un metal que forma una película pasiva mediante la aplicación de una corriente anódica externa.

13.10 PROBLEMAS

Las respuestas a los problemas marcados con un asterisco se encuentran al final del libro.

13.1 Defina la corrosión cuando ésta se refiere a materiales.

13.2 ¿Cuáles son algunos de los factores que afectan la corrosión de metales?

13.3 ¿Cuál está en el estado de energía más baja: *a*) hierro elemental o *b*) Fe_2O_3 (óxido de hierro)?

13.4 Proporcione ejemplos de deterioro ambiental de *a*) materiales cerámicos y *b*) materiales poliméricos.

13.5 ¿Cómo se llama la reacción de oxidación en la cual los metales forman iones que pasan a una solución acuosa en una reacción de corrosión electroquímica? ¿Qué tipos de iones producen esta reacción? Escriba la reacción de oxidación de media celda para la oxidación de metal de zinc puro en solución acuosa.

13.6 ¿Cómo se llama la reacción de reducción en la que un metal o no metal se reduce en carga de valencia en una reacción de corrosión electroquímica? ¿En esta reacción se crean o consumen electrones?

13.7 ¿Cuál es el potencial estándar de oxidación-reducción de media celda?

13.8 Describa un método utilizado para determinar el potencial de oxidación-reducción de media celda de un metal utilizando una media celda de hidrógeno.

13.9 Liste cinco metales que sean catódicos respecto al hidrógeno e indique sus potenciales de oxidación estándar. Liste cinco metales que sean anódicos respecto del hidrógeno y proporcione sus potenciales de oxidación estándar.

13.10 Considere una celda galvánica de magnesio-hierro consistente en un electrodo de magnesio en una solución de 1 *M* de $MgSO_4$ y un electrodo de hierro en una solución de 1 *M* de $FeSO_4$. Cada electrodo y su electrolito están separados por una pared porosa, y toda la celda está a 25°C. Ambos electrodos se conectan con un alambre de hierro.

a) ¿Cuál electrodo es el ánodo?

b) ¿Cuál electrodo se corroe?

c) ¿En qué dirección fluirán los electrones?

d) ¿En qué dirección se moverán los aniones en las soluciones?

e) ¿En qué direcciones se moverán los cationes en las soluciones?

f) Escriba la ecuación para la reacción de media celda en el ánodo.

g) Escriba la ecuación para la reacción de media celda en el cátodo.

13.11 Una celda galvánica estándar tiene electrodos de zinc y estaño. ¿Cuál electrodo es el ánodo? ¿Cuál electrodo se corroe? ¿Cuál es la fem de la celda?

***13.12** Una celda galvánica estándar tiene electrodos de hierro y plomo. ¿Cuál electrodo es el ánodo? ¿Cuál electrodo se corroe? ¿Cuál es la fem de la celda?

***13.13** La fem de una celda galvánica estándar de Ni-Cd es -0.153 V. Si la fem de la media celda estándar para la oxidación de Ni es -0.250 V, ¿Cuál es la fem de la media celda estándar de cadmio si éste es el ánodo?

13.14 ¿Cuál es la fem con respecto al electrodo de hidrógeno estándar de un electrodo de cadmio que está sumergido en un electrolito de 0.04 de $CdCl_2$? Suponga que la reacción de la media celda de cadmio es $Cd \rightarrow Cd^{2+} + 2e^-$.

13.15 Una celda galvánica consiste en un electrodo de níquel en una solución de 0.08 *M* de $NiSO_4$ a 25°C. Los dos electrodos están separados por una pared porosa. ¿Cuál es la fem de la celda?

13.16 Una celda galvánica está formada por un electrodo de zinc en una solución de 0.03 *M* de $ZnSO_4$ y un electrodo de cobre en una solución de 0.06 *M* de $CuSO_4$ a 25°C. ¿Cuál es la fem de la celda?

***13.17** Un electrodo de níquel está sumergido en una solución de $NiSO_4$ a 25°C. ¿Cuál debe ser la molaridad de la solución si el electrodo presenta un potencial de -0.2842 V con respecto a un electrodo de hidrógeno estándar?

13.18 Un electrodo de cobre está sumergido en una solución de $CuSO_4$ a 25°C. ¿Cuál debe ser la molaridad de la solución si el electrodo presenta un potencial de $+0.2985$ V con respecto a un electrodo de hidrógeno estándar?

13.19 Un extremo de un alambre de zinc está sumergido en un electrolito de 0.07 *M* de iones Zn^{2+} y el otro en uno de 0.002 *M* de iones de Zn^{2+}, con dos electrolitos separados por una pared porosa.

a) ¿Cuál extremo del alambre se corroerá?

b) ¿Cuál será la diferencia de potencial entre los dos extremos del alambre cuando se acaban de sumergir en los electrolitos?

13.20 Ocurren concentraciones de magnesio (Mg^{2+}) de 0.04 *M* y 0.007 *M* en un electrolito en extremos opuestos de un alambre de magnesio a 25°C.
a) ¿Cuál extremo del alambre se corroerá?
b) ¿Cuál será la diferencia de potencial entre los extremos del alambre?

13.21 Considere una celda de concentración de oxígeno consistente en dos electrodos de zinc. Uno está sumergido en una solución de agua con baja concentración de oxígeno y el otro en una solución de agua con alta concentración de oxígeno. Los electrodos de zinc están conectados mediante un alambre de cobre externo.
a) ¿Cuál electrodo se corroerá?
b) Escriba las reacciones de media celda para la reacción anódica y la reacción catódica.

13.22 En metales, ¿cuál región es más reactiva químicamente (anódica), la matriz de grano o las regiones de fronteras de grano? ¿Por qué?

13.23 Considere un acero al carbón a 0.95 por ciento. ¿En cuáles condiciones es el acero más resistente a la corrosión: *a*) martensítico o *b*) martensítico templado con carburo ϵ y Fe_3C formado en el intervalo de 200 a 500°C? Explique.

13.24 ¿Por qué los metales puros son en general más resistentes a la corrosión que los impuros?

13.25 Un proceso de electrodepositación utiliza 15 A de corriente corroyendo químicamente (disolviendo) un ánodo de cobre. ¿Cuál es la velocidad de corrosión del ánodo en gramos por hora?

***13.26** Un proceso de electrodepositación de cadmio emplea 10 A de corriente y corroe químicamente a un ánodo de cadmio. ¿Cuánto le tomará corroer 8.2 g de cadmio del ánodo?

13.27 Un tanque de acero blando de 60 cm de alto con un fondo cuadrado de 30×30 cm se llena con agua aereada hasta el nivel de 45 cm y muestra una pérdida por corrosión de 350 g en un periodo de cuatro semanas. Calcule *a*) la corriente de corrosión y *b*) la densidad de corrosión asociada con la corriente de corrosión. Suponga que la corrosión es uniforme sobre todas las superficies y que el acero blando se corroe de la misma manera que el hierro puro.

***13.28** Un tanque de acero cilíndrico se recubre con una gruesa capa de zinc en el interior. El tanque mide 50 cm de diámetro, 70 cm de altura y se llena hasta el nivel de 45 cm con agua aereada. Si la corriente de corrosión es 5.8×10^{-5} A/cm^2, ¿qué cantidad de zinc en gramos por minuto se está corroyendo?

13.29 Un tanque de acero blando calentado que contiene agua se está corroyendo a una velocidad de 90 mdd. Si la corrosión es uniforme, ¿cuánto tiempo tardará para que se corroa 0.40 mm la pared del tanque?

13.30 Un tanque de acero blando contiene una solución de nitrato de amoniaco y se está corroyendo a la velocidad de 6000 mdd. Si la corrosión en la superficie interior es uniforme, ¿Cuánto tiempo tardará para que se corroa la pared del tanque 1.05 mm?

***13.31** Una superficie de estaño se corroe uniformemente a una velocidad de 2.40 mdd. ¿Cuál es la densidad de corriente asociada a esta velocidad de corrosión?

13.32 Una superficie de cobre se está corroyendo en agua de mar a una densidad de corriente de 2.30×10^{-6} A/cm^2. ¿Cuál es la velocidad de corrosión en mdd?

13.33 Si una superficie de zinc se está corroyendo a una densidad de corriente de 3.45×10^{-7} A/cm^2, ¿qué grosor de metal se corroerá en 210 días?

***13.34** Se encuentra que una lamina de acero galvanizado (con recubrimiento de zinc) se corroe uniformemente a la velocidad de 12.5×10^{-3} mm/año. ¿Cuál es la densidad de corrosión promedio asociada con la corrosión de este material?

13.35 Se encuentra una lamina de acero galvanizado (con recubrimiento de zinc) que se corroe uniformemente con una densidad de corriente promedio de 1.32×10^{-7} A/cm^2. ¿En cuántos años se corroerá uniformemente un grosor de 0.030 mm del recubrimiento de zinc?

13.36 Un nuevo contenedor de aluminio produce picaduras en línea recta a través de sus paredes en 350 días por causa de la corrosión por picaduras. Si la picadura promedio es de 0.170 mm de diámetro y la pared del contenedor es de 1.00 mm de grosor, ¿cuál es el corriente promedio asociado con la formación de una sola picadura? ¿Cuál es la densidad de corriente para esta corrosión utilizando el área superficial de la picadura en este cálculo? Suponga que las picaduras tienen forma cilíndrica.

13.37 Un contenedor nuevo de aluminio desarrolla picaduras en línea recta a través de sus paredes con una densidad de corriente promedio de 1.30×10^{-4} A/cm^2. Si la picadura promedio es de 0.70 mm de diámetro y la pared de aluminio es de 0.90 mm de grosor, ¿cuántos días transcurrirán para que una picadura se corroa a través de la pared? Suponga que la picadura tiene forma cilíndrica y que la corriente de corrosión actúa uniformemente sobre el área superficial de la picadura.

13.38 ¿Cuál es la densidad de corriente de intercambio? ¿Cuál es la corriente de corrosión i_{corr}?

13.39 Defina y dé un ejemplo de *a*) polarización de activación y *b*) polarización de concentración.

13.40 Defina la pasivación de un metal o aleación. Proporcione ejemplos de algunos metales y aleaciones que muestran pasividad.

13.41 Describa brevemente las siguientes teorías de la pasividad de metales: *a*) la teoría de oxidación y *b*) la teoría de adsorción.

13.42 Dibuje una curva de polarización para un metal pasivo e indique sobre ella *a*) el voltaje pasivo primario E_{pp} y *b*) la corriente pasiva i_p.

13.43 Describa el comportamiento de corrosión de un metal pasivo en *a*) la región activa, *b*) la región pasiva y *c*) la región transpasiva de una curva de polarización. Explique las razones para el diferente comportamiento en cada región.

13.44 Explique el comportamiento electroquímico en el exterior y el interior de una delgada placa usada como contenedor de alimentos.

13.45 Explique la diferencia en el comportamiento de corrosión de *a*) un cátodo grande y un cátodo pequeño y *b*) un ánodo grande y un ánodo pequeño. ¿Cuál de las dos condiciones es más favorable desde el punto de vista de la prevención de la corrosión y por qué?

13.46 ¿Qué es la corrosión por picaduras? ¿Dónde suelen iniciarse las picaduras? Describa un mecanismo electroquímico para el crecimiento de una picadura en un acero inoxidable sumergido en una solución de cloruro de sodio aereada.

13.47 Desde un punto de vista ingenieril, ¿Qué metales se usarían en los casos en que es importante la resistencia a las picaduras?

13.48 ¿Qué es la corrosión por desgaste? Describa un mecanismo electroquímico para la corrosión por desgaste de un acero inoxidable en una solución de cloruro de sodio aereada.

13.49 Desde un punto de vista de diseño ingenieril, ¿qué debe hacerse para prevenir o minimizar la corrosión por grietas?

13.50 ¿Qué es la corrosión intergranular? Describa la condición metalúrgica que puede producir corrosión intergranular en un acero inoxidable austenítico.

13.51 Para un acero inoxidable austenítico, distinga entre *a*) la condición sensibilizada y *b*) la condición estabilizada.

13.52 Describa tres métodos para evitar la corrosión intergranular en aceros inoxidables austeníticos.

13.53 ¿Qué son las grietas por corrosión por esfuerzo? Describa un mecanismo de las GCE.

13.54 Desde un punto de vista de diseño ingenieril, ¿qué puede hacerse para evitar o minimizar las grietas por corrosión por esfuerzo?

13.55 ¿Qué es la corrosión por erosión? ¿Qué es el daño por cavitación?

13.56 Describa la corrosión por desgaste.

13.57 ¿Qué es la fuga selectiva de una aleación? ¿Qué tipos de aleaciones son especialmente susceptibles a este tipo de corrosión?

13.58 Describa un mecanismo para la deszinificación de latón 70-30.

13.59 ¿Qué factores son importantes si un metal formará un óxido protector?

13.60 Calcule los cocientes de volúmenes óxido-metal (Pilling-Bedworth) para la oxidación de los metales listados en la siguiente tabla, y comente si sus óxidos podrían o no ser protectores.

Metal	Óxido	Densidad del metal (g/cm^3)	Densidad del óxido (g/cm^3)
Tungsteno, W	WO_3	19.35	12.11
Sodio, Na	Na_2O	0.967	2.27
Hafnio, Hf	HfO_2	13.31	9.68
Cobre, Cu	CuO	8.92	6.43
Manganeso, Mn	MnO	7.20	5.46
Estaño, Sn	SnO	6.56	6.45

13.61 Describa los mecanismos de difusión de aniones y cationes de la formación de óxido sobre metales.

13.62 Mediante ecuaciones, describa el siguiente comportamiento de oxidación de metales: *a*) lineal, *b*) parabólico, *c*) logarítmico. Dé ejemplos.

13.63 Una muestra de 1 cm^2, y 0.75 mm de espesor de 99.9% en peso de Ni se oxida en oxígeno a una presión de 1 atm y 500°C. Después de 7 h la muestra presenta una ganancia en peso de 60 $\mu g/cm^2$. Si el proceso de oxidación sigue un comportamiento parabólico, ¿cuál será la ganancia en peso después de 20 h de oxidación?

***13.64** Una muestra de hierro puro se oxida de acuerdo con la ley de la velocidad de oxidación lineal. Después de 3 h a 720°C, una muestra de 1 cm^2 presenta una ganancia en peso de 7 $\mu g/cm^2$. ¿Qué tiempo de oxidación se necesitará para que la muestra presente una ganancia en peso de 55 $\mu g/cm^2$?

13.65 ¿Qué es la oxidación catastrófica? ¿Cuáles son los metales que están expuestos a este comportamiento? ¿Cuáles son los metales que al agregarse a aleaciones de hierro retardan este comportamiento?

13.66 ¿Qué tipos de aleaciones se usan para moderar las condiciones de oxidización en la resistencia a la corrosión?

13.67 ¿Qué tipos de aleaciones se usan para la resistencia a la corrosión en condiciones de alta oxidización?

13.68 Liste seis combinaciones de metales y ambiente que tengan buena resistencia a la corrosión.

13.69 Liste algunas de las aplicaciones de materiales no metálicos para el control de la corrosión.

13.70 ¿Cuál es la función de cada una de la tres capas de la "placa de cromo"?

13.71 ¿Cuáles son las aleaciones Alclad?

13.72 Describa ocho reglas de diseño de ingeniería que puedan ser importantes para reducir o prevenir la corrosión.

13.73 Describa cuatro métodos de alteración de ambiente para prevenir o reducir la corrosión.

13.74 Describa dos métodos mediante los cuales pueda utilizarse la protección catódica para proteger tubería de acero contra la corrosión.

***13.75** Si un ánodo de zinc de sacrificio muestra una pérdida por corrosión de 1.05 kg en 55 días, ¿cuál es la corriente promedio producida por el proceso de corrosión en este periodo?

13.76 Si un ánodo de magnesio de sacrificio se corroe con una corriente promedio de 0.80 A durante 100 días, ¿cuál debe ser la pérdida de metal del ánodo en este lapso?

13.77 ¿Qué es la protección anódica? ¿En qué metales y aleaciones puede emplearse? ¿Cuáles son algunas de sus ventajas y desventajas?

13.11 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. Un tanque de almacenamiento de agua hecho con acero tiene una pequeña grieta en su pared interior sumergida en agua. Pruebas ultrasónicas indican que la grieta crece con el tiempo. ¿Puede usted indicar las razones de este crecimiento de la grieta, considerando que los esfuerzos que actúan en ella son pequeños?

2. Se van a unir placas de latón mediante pernos y se utilizan en un ambiente marino. ¿Usted seleccionaría pernos de acero o de níquel? ¿Por qué?

3. Usted va a seleccionar el material para una barra que se utilizará en un ambiente acuoso y su principal preocupación es la corrosión. Cuenta con tres opciones: Cu con 20% en peso de Zn, 30% de Cu trabajado en frío con 20% en peso de Zn y Cu con 50% en peso de Zn. ¿Cuál metal eligiría y por qué? (Consulte la figura 8.25 para su respuesta.)

4. Dependiendo de la calidad de concreto, es posible que barras de acero de refuerzo se corroan por causa del agua que penetra del ambiente a través de pequeños poros en el concreto. Proponga maneras de proteger contra la corrosión a los refuerzos.

5. La corrosión por erosión ocurre en tuberías que transportan fluidos con partículas sumergidas duras, como el agua con minerales. Esto es en especial cierto en regiones con codos agudos donde es posible que se genere turbulencia. ¿Qué tipo de protección puede usted ofrecer para reducir la corrosión por erosión en las tuberías?

6. Se observa corrosión en la raíz de los filetes en pernos y en otras áreas con esquinas afiladas. ¿Puede usted explicar esto?

7. La vida por fatiga de componentes se reduce de manera considerable cuando el componente opera en un ambiente corrosivo. Este fenómeno se conoce como fatiga por corrosión. *a*) ¿Puede dar un ejemplo de una situación de este tipo? *b*) Liste factores importantes que influyan en la propagación de grietas por fatiga por corrosión.

8. *a*) Defina la corrosión por exfoliación. *b*) Explique cómo ocurre. *c*) Dé ejemplos de materiales que son susceptibles a la corrosión por exfoliación.

9. *a*) Explique por qué el sistema de escape de los automóviles es en especial susceptible a la corrosión. *b*) ¿Cuál material eligiría en la manufactura de un sistema de escape?

10. ¿Cómo está protegiendo la industria automotriz contra la corrosión a los paneles de la estructura de acero? Dé ejemplos específicos.

11. Los aceros inoxidables ferríticos que contiene pequeñas cantidades de carbón o nitrógeno son más susceptibles a la corrosión intergranular. Explique cómo causan lo anterior el carbón y el nitrógeno.

12. Es posible reducir la corrosión intergranular en acero ferrítico si se agregan pequeñas cantidades de titanio o niobio, proceso que se conoce como *estabilización*. Explique cómo la adición de tales impurezas ayuda a reducir la corrosión.

13. Clasifique la resistencia a la corrosión de las siguientes aleaciones en un ambiente de agua salada (de alta a baja): *a*) Aleaciones de Al, *b*) aleaciones de carbón, *c*) aleaciones de níquel y *d*) acero inoxidable. Dé razones de sus selecciones.

14. Clasifique la resistencia a la corrosión de los siguientes materiales en ambientes sumamente ácidos (de alta a baja): *a*) Al_2O_3 de alúmina, *b*) nailon, *c*) PVC y *d*) hierro fundido. Dé razones de sus selecciones.

15. Clasifique la resistencia a la corrosión de las siguientes clases de materiales cuando éstos se exponen a ambientes UV (de alta a baja): *a*) cerámicas, *b*) polímeros y *c*) metales. Indique razones de sus selecciones.

16. Mediante simples correcciones de diseño es posible reducir de manera considerable la corrosión localizada por grietas. Con base en su conocimiento de la corrosión por grietas, dé ejemplos de tales correcciones de diseño.

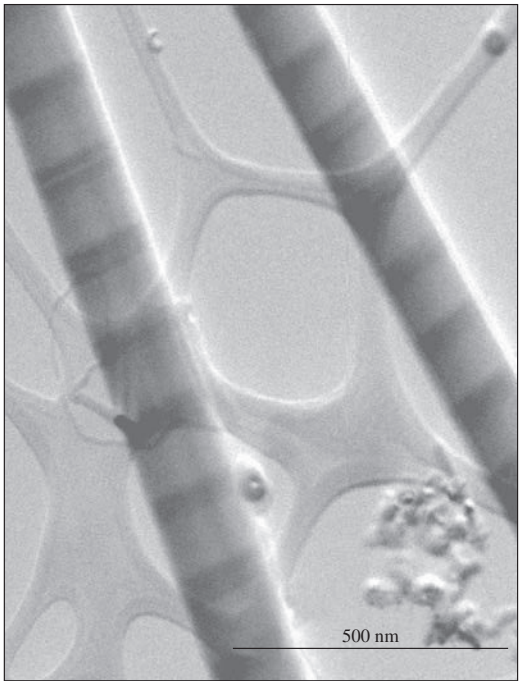
17. En la soldadura de materiales, ¿qué factores generales deben considerarse para minimizar las posibilidades de corrosión?

18. En el diseño de piezas, es por lo general una buena idea evitar regiones o puntos de concentración de esfuerzos puesto que estas regiones son más susceptibles a la corrosión. Dé ejemplos de lo que puede hacerse para evitar aumentos de esfuerzos.

19. Se almacena sal (NaCl) en un contenedor de aluminio. El contenedor se usa de manera repetida en una región húmeda. *a*) ¿Hay una posibilidad de que ocurra una reacción catódica y anódica? *b*) Si es así, identifique la reacción.

CAPÍTULO

14 Propiedades eléctricas de materiales



(© Peidong Yang/UC Berkeley)

Los investigadores constantemente están tratando de descubrir formas de fabricar chips de computadora con dimensiones más pequeñas y más dispositivos. La industria actual se enfoca en desarrollar la nanotecnología que se requiere para fabricar dispositivos electrónicos en un nanoalambre con un diámetro de, aproximadamente, 100 nm.

La foto de inicio de capítulo es la imagen de microscopia electrónica de transmisión de dos nanoalambres heterogéneos con capas alternas de (silicio/germanio), oscura y (silicio), luminosa.[1]

En este capítulo, se considera primero la conducción eléctrica en metales. Se discuten los efectos de impurezas, adiciones de aleaciones y temperatura en la conductividad eléctrica de metales. Después se estudia el modelo de bandas de energía de la conducción eléctrica en metales. A lo anterior sigue el análisis de los efectos de impurezas y temperatura en la conductividad eléctrica de materiales semiconductores. Por último, se examinan los principios de operación de algunos dispositivos de semiconducción básicos, y se presentan algunos de los procesos de fabricación que se utilizan para producir la moderna microelectrónica para circuitos. Un ejemplo de la complejidad de la reciente circuitería integrada microelectrónica se muestra en al figura 14.1. ■

[1] http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2002/02/05_wires.html

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

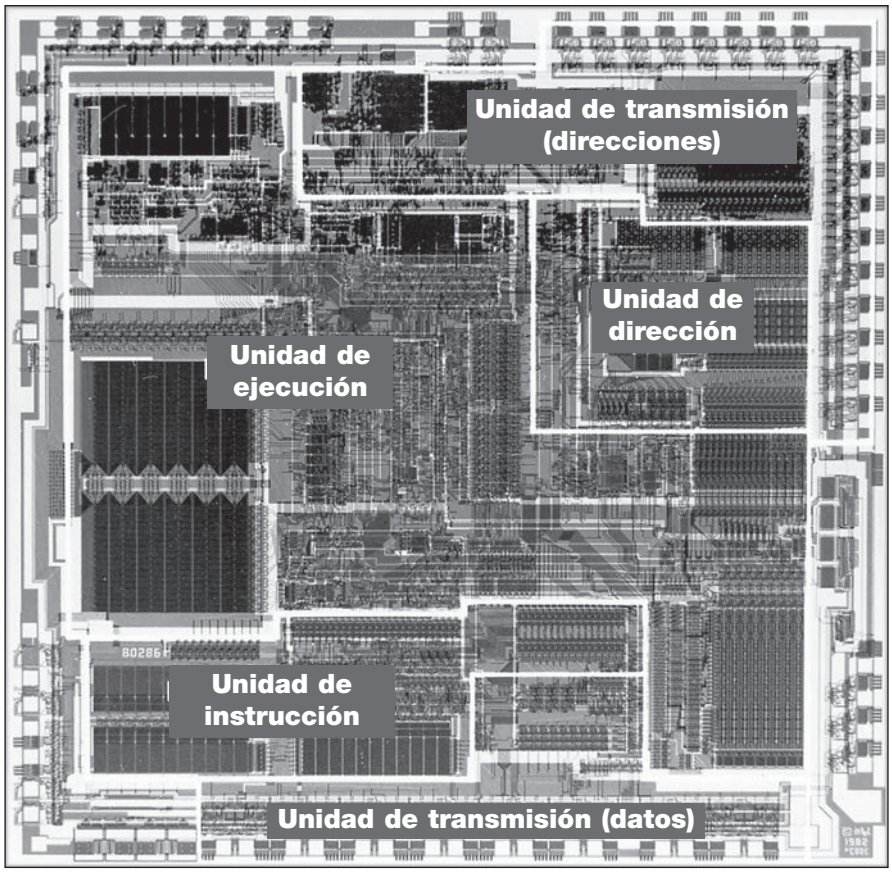
1. Definir la conductividad, la semiconductividad y las propiedades aislantes de materiales, y clasificar, de una manera general, metales, cerámicas y polímeros de acuerdo con sus propiedades eléctricas.
2. Explicar el concepto de conductividad eléctrica, resistividad, velocidad de arrastre y camino libre medio en metales. Describir el efecto de aumentar o reducir la temperatura en cada uno.
3. Describir el modelo de bandas de energía y definir las propiedades eléctricas de metales, polímeros, cerámicas y materiales electrónicos con base en el mismo.
4. Definir los semiconductores intrínsecos y extrínsecos, y describir cómo se transporta la carga en estos materiales.
5. Definir los semiconductores tipo N y P y conocer el efecto de la temperatura en su comportamiento eléctrico.
6. Nombrar tantos dispositivos semiconductores como sea posible: LED, rectificadores, transistores, y en cada caso explicar cómo funciona el dispositivo.
7. Definir la microelectrónica y explicar diversos pasos en la fabricación de circuitos integrados CI.
8. Explicar en detalle las propiedades eléctricas de cerámicas y cómo se relacionan con dieléctricos, aisladores, capacitores, ferroelectricidad y el efecto piezoeléctrico.
9. Proyectar las tendencias futuras en el área de la fabricación de chips y computadoras.

14.1 CONDUCCIÓN ELÉCTRICA EN METALES

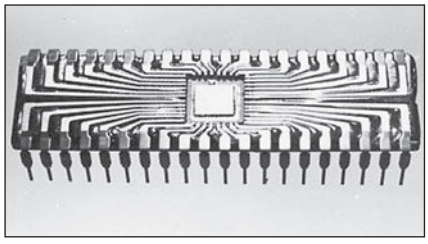
14.1.1 El modelo clásico de la conducción eléctrica en metales

En sólidos metálicos los átomos están distribuidos en una estructura cristalina (por ejemplo, FCC, BCC y HCP) y están ligados mediante sus electrones de valencia exteriores por medio de enlace metálico (véase la sección 2.7). Los enlaces metálicos en metales sólidos hacen posible el movimiento libre de los electrones de valencia puesto que éstos son compartidos por muchos átomos y no están ligados a ninguno en particular. Algunas veces los electrones de valencia se visualizan como si formaran una nube de carga electrónica, como se muestra en la figura 14.2*a*. Otras veces, los electrones de valencia se consideran electrones libres individuales no asociados con ningún átomo en particular, como se ilustra en la figura 14.2*b*.

En el modelo clásico de la conducción eléctrica en sólidos metálicos, los electrones de valencia exteriores se suponen completamente libres de moverse entre los núcleos de iones positivos (átomos sin electrones de valencia) en la retícula metálica. A temperatura ambiente los núcleos de iones positivos tienen energía cinética y vibran alrededor de sus posiciones de retícula. Con el aumento de temperatura, estos iones vibran con amplitudes crecientes y existe un continuo intercambio de energía entre los núcleos de los iones y sus electrones de valencia. En la ausencia de un potencial eléctrico, el movimiento de los electrones de valencia es aleatorio y res-



a)



b)

Figura 14.1
a) El microprocesador o "computadora en un chip" que se muestra está amplificado casi seis veces en un lado e incorpora cerca de 3.1 millones de transistores en un solo chip de silicio que en la actualidad mide alrededor de 17.2 mm por lado. Este microprocesador es el Pentium de Intel y usa tecnología BICMOS con características de diseño mínimas de 0.8 μm. *b*) Mitad de un microprocesador de tamaño, montada en un paquete con los pasos de los alambres de conexión indicados.
(Cortesía de Intel Corporation, Santa Clara, CA.)

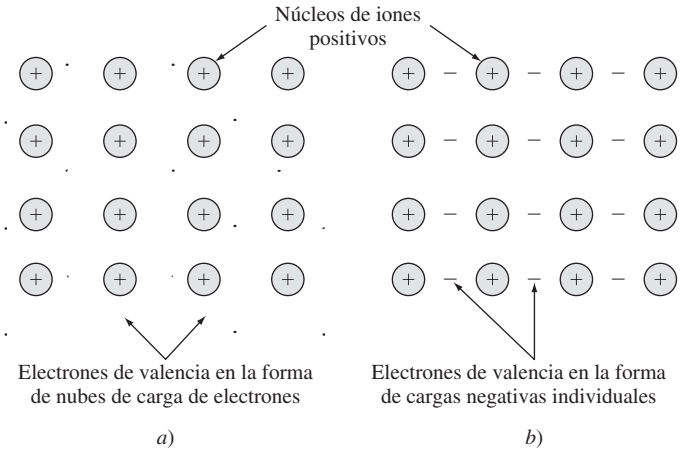


Figura 14.2
Arreglos esquemáticos de átomos en un plano de un metal monovalente como el cobre, la plata o el sodio. En *a*) los electrones de valencia se dibujan como un "gas de electrones" y en *b*) los electrones de valencia se visualizan como electrones libres de carga unitaria.

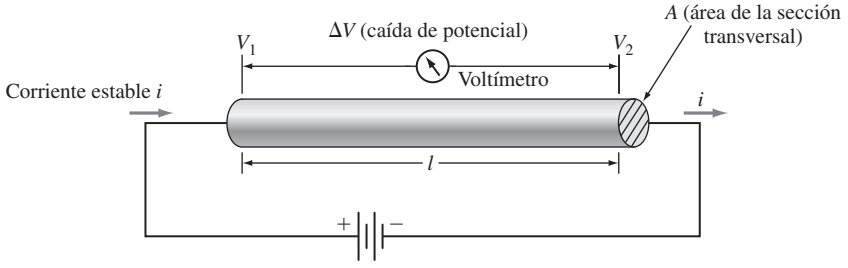


Figura 14.3
Diferencia de potencial ΔV aplicado al espécimen de alambre metálico de área de sección transversal A.

tringido, por lo que no hay flujo de electrones neto en ninguna dirección y, por ello, tampoco flujo de corriente. Ante la presencia de un potencial eléctrico aplicado, los electrones alcanzan una *velocidad de arrastre* dirigida que es proporcional al campo aplicado, pero en la dirección opuesta.

14.1.2 Ley de Ohm

Considérese una longitud de alambre de cobre cuyos extremos están conectados a una batería, como se muestra en la figura 14.3. Si se aplica una diferencia de potencial V, fluirá una corriente i que es proporcional a la resistencia R del alambre. De acuerdo con la *ley de Ohm,* el flujo de **corriente eléctrica** i es proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la resistencia del alambre o

$$i = \frac{V}{R} \qquad \textbf{(14.1)}$$

donde i = corriente eléctrica, A (amperes)
V = diferencia de potencial, V (voltios)
R = resistencia del alambre, Ω (ohmios)

La **resistencia eléctrica** R del alambre de un conductor eléctrico como el espécimen de alambre metálico de la figura 14.3 es directamente proporcional a su longitud l e inversamente proporcional a su área de sección transversal A. Estas cantidades están relacionadas por una constante del material llamada **resistividad eléctrica** ρ, como

$$R = \rho\frac{l}{A} \qquad \text{o} \qquad \rho = R\frac{A}{l} \tag{14.2}$$

Las unidades para la resistividad eléctrica, que es una constante para un material a una temperatura particular, son

$$\rho = R\frac{A}{l} = \Omega\frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \text{ohm-metro} = \Omega \cdot \text{m}$$

A menudo es más conveniente pensar en términos de paso de la corriente eléctrica en vez de la resistencia, y por ello la cantidad **conductividad eléctrica** σ[2] se define como el recíproco de la resistividad eléctrica:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{14.3}$$

Las unidades para la conductividad eléctrica son $(\text{ohm-metro})^{-1} = (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$. La unidad del SI para el recíproco del ohm es el siemens (S), aunque esta unidad rara vez se usa y por ello no se empleará en este libro.

En la tabla 14.1 se enlistan las conductividades eléctricas de algunos metales y no metales seleccionados. De acuerdo con esta tabla, se observa que los conductores eléctricos tales como los metales puros plata, cobre y oro tienen las conductividades más altas, alrededor de $10^7\ (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$. Los **aislantes eléctricos** como el polietileno y el poliestireno, por otro lado, tienen conductividades eléctricas muy bajas, cercanas a $10^{-14}\ (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, las cuales son casi 10^{20} veces menores que las de los metales altamente conductores. El silicio y germanio tienen conductividades entre las de los metales y los aisladores y por ello se clasifican como **semiconductores**.

[2] σ = letra griega sigma.

Tabla 14.1 Conductividades eléctricas de algunos metales y no metales a temperatura ambiente

Metales y aleaciones	$\sigma\ (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$	No metales	$\sigma\ (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$
Plata	6.3×10^7	Grafito	10^5 (promedio)
Cobre, pureza comercial	5.8×10^7	Germanio	2.2
Oro	4.2×10^7	Silicio	4.3×10^{-4}
Aluminio, pureza comercial	3.4×10^7	Polietileno	10^{-14}
		Poliestireno	10^{-14}
		Diamante	10^{-14}

PROBLEMA DE EJEMPLO 14.1

Un alambre cuyo diámetro es de 0.20 cm debe conducir una corriente de 20 A. La máxima disipación de potencia a lo largo del alambre es de 4 W/m (watts por metro). Calcule la conductividad tolerable mínima del alambre en (ohm-metros)$^{-1}$ para esta aplicación.

■ Solución

Potencia $P = iV = i^2R$ donde i = corriente, A R = resistencia, Ω
V = voltaje, V P = potencia, W (watts)

$$R = \rho\frac{l}{A}$$ donde σ = resistividad, $\Omega \cdot$ m
l = longitud, m
A = área de la sección transversal del alambre, m^2

Combinando estas dos ecuaciones, se obtiene

$$P = i^2\rho\frac{l}{A} = \frac{i^2 l}{\sigma A} \quad \text{puesto que} \quad \rho = \frac{1}{\sigma}$$

El reagrupamiento produce $$\sigma = \frac{i^2 l}{PA}$$

Dado que $P = 4$ W (en 1 m) $i = 20$ A $l = 1$ m

y $$A = \frac{\pi}{4}(0.0020\text{ m})^2 = 3.14 \times 10^{-6}\text{ m}^2$$

entonces

$$\sigma = \frac{i^2 l}{PA} = \frac{(20\text{ A})^2(1\text{ m})}{(4\text{ W})(3.14 \times 10^{-6}\text{ m}^2)} = 3.18 \times 10^7\,(\Omega \cdot \text{m})^{-1} \blacktriangleleft$$

Por tanto, en esta aplicación, la conductividad σ del alambre debe ser igual a o mayor que $3.18 \times 10^7\,(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$.

PROBLEMA DE EJEMPLO 14.2

Si un alambre de cobre de pureza comercial conduce 10 A de corriente con una caída de voltaje máxima de 0.4 V/m, ¿cuál debe ser su diámetro mínimo? [σ (Cu comercialmente puro) $= 5.85 \times 10^7\,(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$.]

■ Solución

Ley de Ohm: $$V = iR \quad \text{y} \quad R = \rho\frac{l}{A}$$

Combinando las dos ecuaciones, se obtiene

$$V = i\rho\frac{l}{A}$$

y rearreglando

$$A = i\rho\frac{l}{V}$$

Sustituyendo $(\pi/4)d^2 = A$ y $\rho = 1/\sigma$, se encuentra que

$$\frac{\pi}{4}d^2 = \frac{il}{\sigma V}$$

y al resolver para d se llega a

$$d = \sqrt{\frac{4il}{\pi\sigma V}}$$

Dado que $i = 10$ A, $V = 0.4$ V para un metro de alambre, $l = 1.0$ m (longitud elegida del alambre), y la conductividad del alambre de Cu $\sigma = 5.85 \times 10^7\ (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, entonces

$$d = \sqrt{\frac{4il}{\pi\sigma V}} = \sqrt{\frac{4(10\text{ A})(1.0\text{ m})}{\pi[5.85 \times 10^7\ (\Omega \cdot \text{m})^{-1}](0.4\text{ V})}} = 7.37 \times 10^{-4}\text{ m} \blacktriangleleft$$

Por tanto, para esta aplicación, el alambre de Cu debe tener el diámetro de 7.37×10^{-4} m o mayor.

La ecuación 14.1 recibe el nombre de *forma macroscópica* de la ley de Ohm, ya que los valores de i, V y R son dependientes de la forma geométrica de un conductor eléctrico particular. También es posible expresar la ley de Ohm en *forma microscópica*, la cual es independiente de la forma del conductor eléctrico:

$$\mathbf{J} = \frac{\mathbf{E}}{\rho} \quad \text{o} \quad \mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \tag{14.4}$$

donde $\mathbf{J}$ = densidad de corriente, A/m^2 $\quad \rho$ = resistividad eléctrica, $\Omega \cdot$ m
$\mathbf{E}$ = campo eléctrico, V/m $\quad \sigma$ = conductividad eléctrica ($\Omega \cdot \text{m}^{-1}$)

La **densidad de corriente J** y el campo eléctrico **E** son cantidades vectoriales con magnitud y dirección. Ambas formas macroscópica y microscópica de la ley de Ohm se comparan en la tabla 14.2.

Tabla 14.2 Comparación de las formas macroscópica y microscópica de la ley de Ohm

Forma macroscópica de la ley de Ohm	Forma microscópica de la ley de Ohm
$i = \dfrac{V}{R}$	$\mathbf{J} = \dfrac{\mathbf{E}}{\rho}$
donde i = corriente, A V = voltaje, V R = resistencia, Ω	donde $\mathbf{J}$ = densidad de corriente, A/m^2 $\mathbf{E}$ = campo eléctrico, V/m ρ = resistividad eléctrica, $\Omega \cdot$ m

14.1.3 Velocidad de arrastre de electrones en un metal conductor

A temperatura ambiente los núcleos de iones positivos en la red cristalina de un conductor metálico vibran alrededor de posiciones neutras y por ello poseen energía cinética. Los electrones libres intercambian continuamente energía con los iones de la retícula mediante colisiones elásticas e inelásticas. Puesto que no hay campo eléctrico externo, el movimiento de los electrones es aleatorio, y en virtud de que no hay un movimiento neto de electrones en ninguna dirección, no hay flujo de corriente.

Si se aplica un campo eléctrico uniforme de intensidad **E** al conductor, los electrones se aceleran con una velocidad definida en la dirección opuesta al campo aplicado. Los electrones chocan periódicamente con los núcleos de iones en la retícula y pierden su energía cinética. Después de un choque, los electrones tienen la libertad de acelerarse otra vez en el campo aplicado, y, como resultado, la velocidad de los electrones varía con el tiempo en una manera "diente de cierra", como se ilustra en la figura 14.4. El tiempo promedio entre colisiones es 2τ donde τ es el *tiempo de relajación*.

Los electrones adquieren entonces una velocidad de arrastre promedio $\mathbf{v}_d$ que es directamente proporcional al campo eléctrico aplicado **E**. La relación entre la velocidad de arrastre y el campo aplicado es

$$\mathbf{v}_d = \mu \mathbf{E} \tag{14.5}$$

donde μ (mu), la movilidad de los electrones, $m^2/(V \cdot s)$, es la constante de proporcionalidad.

Considérese que el alambre que se muestra en la figura 14.5 tiene una densidad de corriente **J** que fluye en la dirección indicada. La densidad de corriente por definición es igual a la velocidad a la cual la carga cruza cualquier plano que es perpendicular a **J**; esto es, un cierto número de amperes por metro cuadrado o culombios por segundo por metro cuadrado fluyen a través del plano.

El flujo de electrones en un alambre metálico sujeto a una diferencia de potencial depende del número de electrones por unidad de volumen, la carga electrónica $-e(-1.60 \times 10^{-19}\ \text{C})$, y la velocidad de arrastre de los electrones, $\mathbf{v}_d$. La velocidad

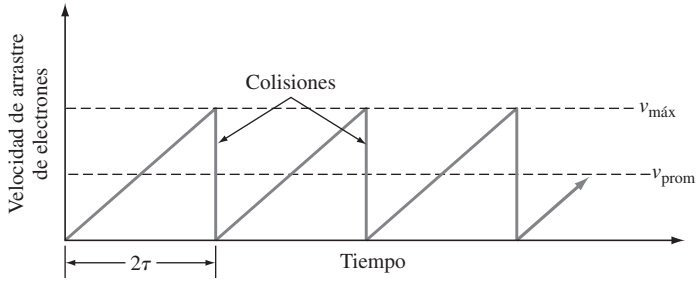


Figura 14.4
Velocidad de arrastre de electrones en función del tiempo correspondiente al modelo clásico de conductividad eléctrica de un electrón libre en un metal.

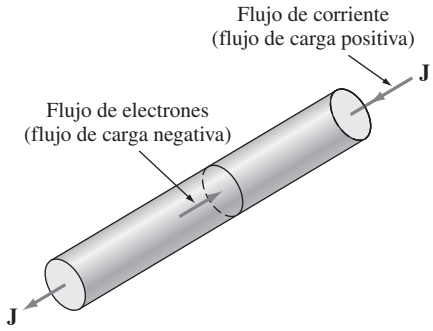


Figura 14.5
Diferencia de potencial a lo largo de un alambre de cobre ocasiona flujo de electrones, como se indica en el dibujo. Debido a la carga negativa del electrón, la dirección del flujo de electrones es opuesta a la del flujo de la corriente convencional, la cual se supone como un flujo de carga positiva.

del flujo de carga por área unitaria es $-ne\mathbf{v}_d$. Sin embargo, por convención, la corriente eléctrica se considera como un flujo de carga positiva y, por ello, a la densidad de corriente **J** se le asigna un signo positivo. Por tanto, en forma de ecuación,

$$\mathbf{J} = ne\mathbf{v}_d \tag{14.6}$$

14.1.4 Resistividad eléctrica de metales

La resistividad eléctrica de un metal puro puede aproximarse mediante la suma de dos términos, un componente térmico ρ_T y un componente residual ρ_r:

$$\rho_{\text{total}} = \rho_T + \rho_r \tag{14.7}$$

El componente térmico surge de las vibraciones de los núcleos de iones positivos alrededor de sus posiciones de equilibrio en la red cristalina metálica. Conforme aumenta la temperatura, los núcleos de iones vibran más y más, y un gran número de ondas elásticas excitadas térmicamente (llamadas *fonones*) dispersan a los electrones de conducción y disminuyen el recorrido libre medio y los tiempos de relajación entre colisiones. De este modo, cuando se incrementa la temperatura, aumentan las resistividades eléctricas de metales puros, como se muestra en la figura 14.6. El componente residual de la resistividad eléctrica de metales puros es pequeño y se debe a las imperfecciones estructurales como dislocaciones, fronteras de grano y átomos de impurezas que dispersan electrones. El componente residual es casi independiente de la temperatura y se vuelve importante sólo a bajas temperaturas (figura 14.7).

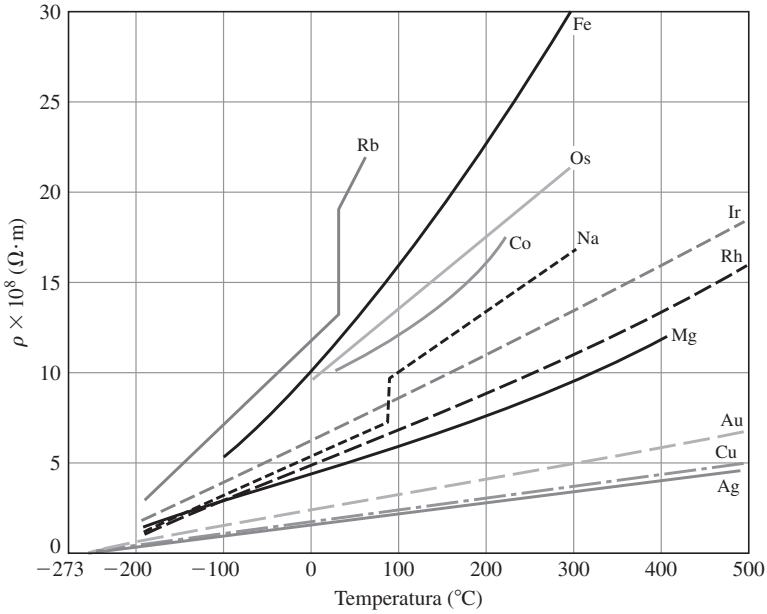


Figura 14.6
El efecto de la temperatura sobre la resistividad eléctrica de metales seleccionados. Adviértase que hay una relación casi lineal entre la resistividad y la temperatura (°C).
(Tomado de Zwikker, "Physical Properties of Solid Materials", Pergamon, 1954, pp. 247, 249.)

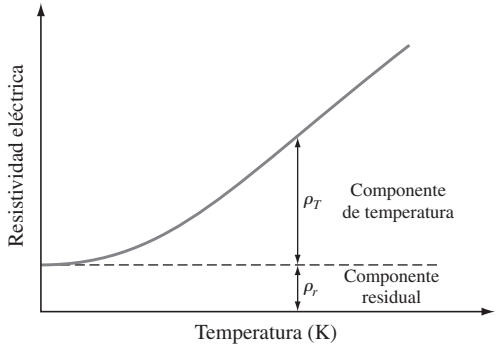


Figura 14.7
Variaciones esquemáticas de la resistividad eléctrica de un metal con la temperatura absoluta. Adviértase que a temperaturas más altas la resistividad eléctrica es la suma de un componente residual ρ_r y un componente térmico ρ_t.

Tabla 14.3 Coeficientes de resistividad de temperatura

Metal	Resistividad eléctrica a 0°C ($\mu\Omega \cdot$ cm)	Coeficiente de resistividad de temperatura α_T ($°C^{-1}$)
Aluminio	2.7	0.0039
Cobre	1.6	0.0039
Oro	2.3	0.0034
Hierro	9	0.0045
Plata	1.47	0.0038

Para la mayor parte de los metales a temperaturas por arriba de aproximadamente –200°C, la resistividad eléctrica varía casi linealmente con la temperatura, como se indica en la figura 14.6. De este modo, las resistividades eléctricas de muchos metales pueden aproximarse mediante la ecuación

$$\rho_T = \rho_{0°C}(1 + \alpha_T T) \tag{14.8}$$

donde $\rho_{0°C}$ = resistividad eléctrica a 0°C
α_T = coeficiente de resistividad dependiente de la temperatura, $°C^{-1}$
T = temperatura de metal, °C

En la tabla 14.3 se enlistan los coeficientes de resistividad de temperatura de metales seleccionados. Para estos metales, α_T varía de 0.0034 a 0.0045 ($°C^{-1}$).

PROBLEMA DE EJEMPLO 14.3

Calcule la resistividad eléctrica de cobre puro a 132°C, utilizando el coeficiente de resistividad de temperatura para el cobre de la tabla 14.3.

■ **Solución**

$$\begin{aligned}\rho_T &= \rho_{0°C}(1 + \alpha_T T) \qquad (14.8)\\ &= 1.6 \times 10^{-6}\,\Omega \cdot \text{cm}\left(1 + \frac{0.0039}{°C} \times 132°C\right)\\ &= 2.42 \times 10^{-6}\,\Omega \cdot \text{cm}\\ &= 2.42 \times 10^{-8}\,\Omega \cdot \text{m} \blacktriangleleft\end{aligned}$$

Los elementos aleantes que se agregan a metales puros provocan dispersión adicional de los electrones de conducción y por ello aumentan la resistividad eléctrica de dichos metales. El efecto de pequeñas adiciones de diversos elementos en la resistividad eléctrica de cobre puro a temperatura ambiente se muestra en la figura 14.8. Adviértase que el efecto de cada elemento varía de manera considerable. Para los elementos que se muestran, la plata es la que menos aumenta la resistividad y el fósforo es el que más la aumenta para la misma cantidad agregada. La adición de cantidades mayores de elementos aleantes, como de 5 a 35 por ciento de zinc a cobre, para hacer latones cobre-zinc, incrementa la resistividad eléctrica y disminuye entonces en forma considerable la conductividad eléctrica del cobre puro, como se ilustra en la figura 14.9.

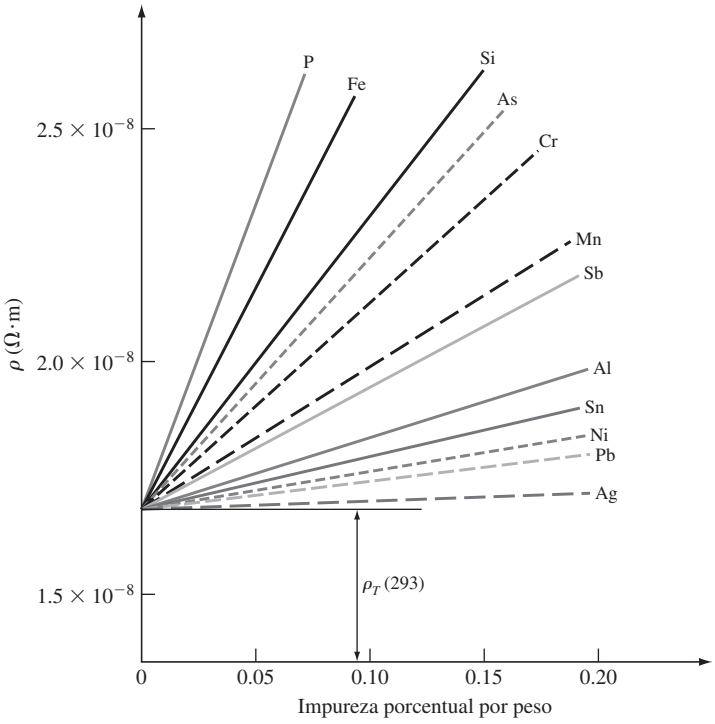


Figura 14.8
El efecto de pequeñas adiciones de diversos elementos en la resistividad eléctrica a temperatura ambiente del cobre.
[Tomado de F. Pawlek y K. Reichel, Z. Metallkd., **47:***347(1956).]*

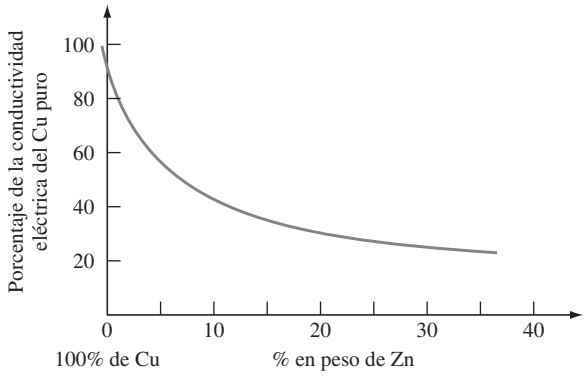


Figura 14.9
El efecto de adiciones de zinc a cobre puro en la reducción de la conductividad eléctrica del cobre.
(Tomado de datos de ASM.)

14.2 MODELO DE BANDAS DE ENERGÍA PARA LA CONDUCCIÓN ELÉCTRICA

14.2.1 Modelo de bandas de energía para metales

Se considerará ahora el **modelo de bandas de energía** para electrones y metales sólidos puesto que ello ayudará a comprender el mecanismo de la conducción eléctrica en metales. Se recurre al sodio metálico para explicar el modelo de bandas de energía puesto que el átomo de sodio tiene una estructura electrónica relativamente simple.

Los electrones de átomos aislados se encuentran ligados a sus núcleos y sólo pueden tener niveles de energía que están *exactamente definidos,* como los estados $1s^1$, $1s^2$, $2s^1$, $2s^2$, . . . de acuerdo con lo que postula el principio de Pauli. De otro modo, sería posible que todos los electrones en un átomo descendieran al estado de energía más bajo, ¡$1s^1$! De tal manera que, los 11 electrones en el átomo de sodio neutro ocupan dos estados 1*s*, dos estados 2*s*, seis estados 2*p* y un estado 3*s*, como se ilustra en la figura 14.10*a*. Los electrones en los niveles inferiores ($1s^2$, $2s^2$, $2p^6$) están firmemente ligados y constituyen los *electrones del núcleo* del átomo de sodio (figura 14.10*b*). El electrón $3s^1$ exterior puede estar implicado en enlaces con otros átomos y se conoce como el *electrón de valencia*.

En un bloque sólido de metal los átomos están muy juntos y en contacto mutuo. Los electrones de valencia que no están localizados (figura 14.11*a*) interactúan e interpenetran a cada uno de los demás de manera que sus niveles de energía atómica originales se amplían hacia regiones más anchas conocidas como *bandas de energía* (figura 14.11*b*). Los electrones internos, puesto que están protegidos de los electrones de valencia, no forman bandas.

Cada electrón de valencia en un bloque de metal de sodio, por ejemplo, debe tener un nivel de energía un poco diferente de acuerdo con el principio de exclusión de Pauli. Por tanto, si hay *N* átomos de sodio en un bloque de sodio, donde *N* pue-

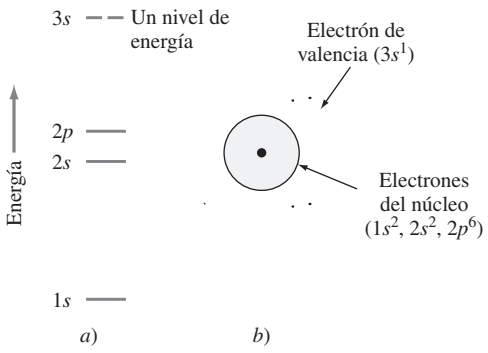


Figura 14.10
a) Niveles de energía en un solo átomo de sodio. *b*) Arreglo de electrones en un átomo de sodio. El electrón de valencia $3s^1$ exterior está ligado débilmente y tiene la libertad de involucrarse en un enlace metálico.

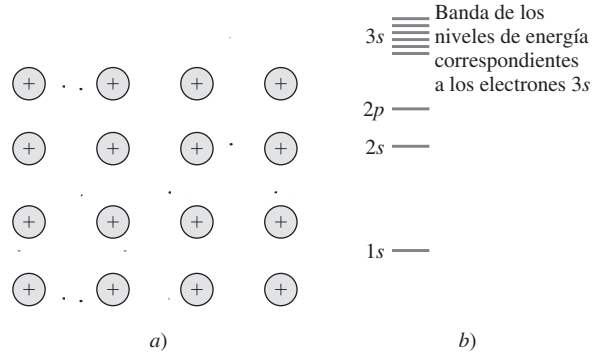


Figura 14.11
a) Electrones de valencia no localizados en un bloque de metal de sodio. *b*) Niveles de energía en un bloque de metal de sodio; adviértase la expansión del nivel 3*s* en una banda de energía y que la banda 3*s* se muestra más próxima al nivel 2*p*, puesto que el enlace ha causado una reducción de los niveles 3*s* de los átomos de sodio aislados.

de ser muy grande, habrá N distintos niveles de energía, sólo un poco diferentes $3s^1$ en la *banda* de energía 3*s*. Cada nivel de energía se denomina un *estado*. En la banda de energía de valencia los niveles de energía son tan próximos que forman una banda de energía continua.

En la figura 14.12 se muestra parte del diagrama de bandas de energía para el sodio metálico como una función del espaciamiento interatómico. En el sodio metálico sólido se traslapan las bandas de energía 3*s* y 3*p* (figura 14.12). Sin embargo, puesto que sólo hay un electrón 3*s* en el átomo de sodio, la banda 3*s* sólo está llena a la mitad (figura 14.3*a*). Como consecuencia, se requiere muy poca energía para excitar electrones en el sodio desde los estados llenos más altos hasta los vacíos más bajos. El sodio es, por tanto, un buen conductor puesto que se requiere muy poca energía para producir flujo de electrones en él. El cobre, la plata y el oro también tienen bandas *s* exteriores llenas a la mitad.

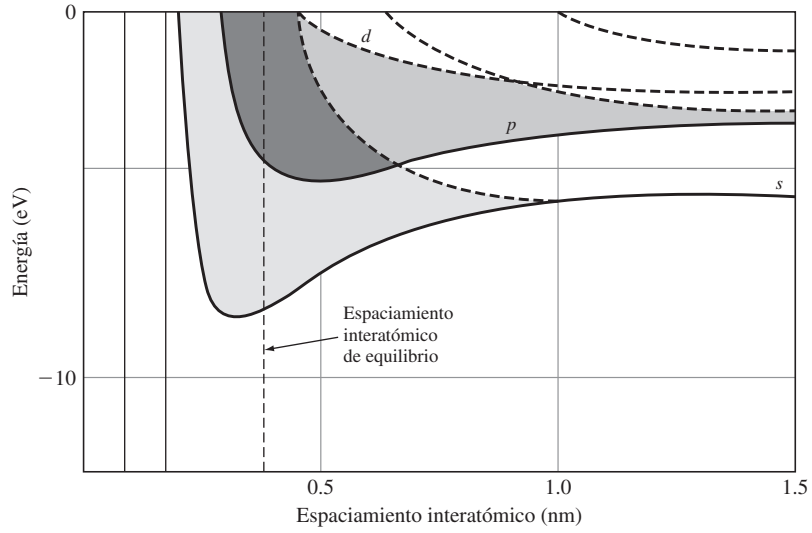


Figura 14.12
Bandas de energía de valencia en metal de sodio. Adviértase la división de los niveles *s*, *p* y *d*.
[Tomado de J. C. Slater, Phys. Rev., **45:***794(1934).]*

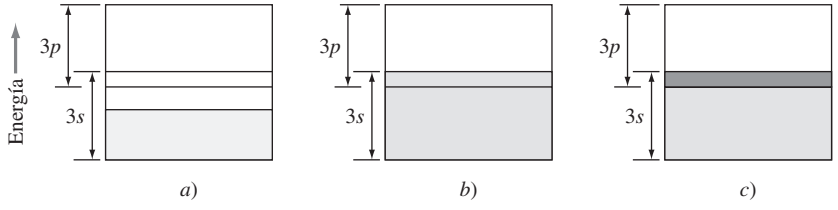
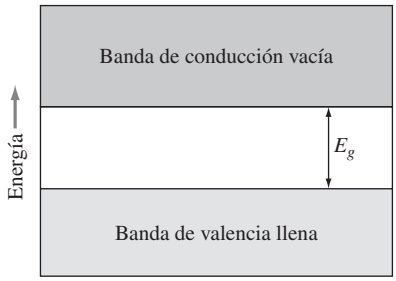


Figura 14.13
Diagramas esquemáticos de bandas de energía para diversos conductores metálicos. *a*) Sodio, $3s^1$: la banda 3*s* está medio llena puesto que sólo hay un electrón $3s^1$. *b*) Magnesio, $3s^2$: la banda 3*s* está llena y se traslapa con la banda 3*p* vacía. *c*) Aluminio, $3s^23p^1$: la banda 3*s* está llena y se traslapa con la banda 3*p* parcialmente llena.



MatVis

Figura 14.14
Diagrama de bandas de energía para un aislante. La banda de valencia está completamente llena y se encuentra separada de la banda de conducción vacía por una gran brecha de energía E_g.

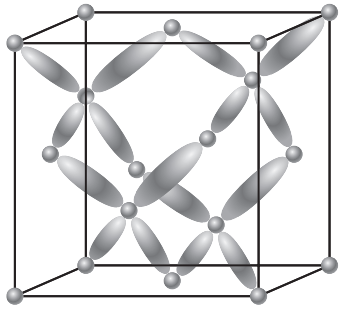


Figura 14.15
Estructura del cristal cúbico de diamante. Los átomos en la estructura están unidos por medio de enlaces covalentes sp^3. El diamante (carbono), el silicio, el germanio y el estaño gris (el estaño polimorfo estable por debajo de 13°C) tienen esta estructura. Hay 8 átomos por celda unitaria: $\frac{1}{8} \times 8$ en las esquinas, $\frac{1}{2} \times 6$ en las caras y 4 dentro del cubo unitario.

En el magnesio metálico ambos estados 3*s* están llenos. Sin embargo, la banda 3*s* se traslapa con la banda 3*p* y permite algunos electrones dentro de ella, lo que crea una banda combinada 3*sp* parcialmente llena (figura 14.13*b*). De este modo, a pesar de la banda 3*s* llena, el magnesio es un buen conductor. De manera similar, el aluminio, que tiene tanto estados 3*s* como un estado 3*p* lleno, también es un buen conductor porque la banda 3*p* llena de manera parcial, se traslapa con la banda 3*s* llena (figura 14.13*c*).

14.2.2 Modelo de bandas de energía para aislantes

En los aislantes, los electrones están ligados firmemente a sus átomos de enlace mediante enlaces iónicos o covalentes y no tienen "libertad" para conducir electricidad a menos que se energicen en forma considerable. El modelo de bandas de energía para aislantes consiste en una **banda de valencia** llena inferior y una **banda de conducción** vacía superior. Estas bandas están separadas por una brecha de energía relativamente grande E_g (figura 14.14). Para liberar un electrón de conducción, la partícula debe energizarse hasta "brincar" la brecha, la cual puede tener un valor tan grande como de 6 a 7 eV; tal es el caso, por ejemplo, del diamante puro. En el diamante, los electrones están firmemente ligados mediante enlaces covalentes tetraédricos sp^3 (figura 14.15).

14.3 SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

14.3.1 El mecanismo de la conducción eléctrica en semiconductores intrínsecos

Los *semiconductores* son materiales cuyas conductividades eléctricas están entre las de metales altamente conductores y aisladores con una conducción pobre. Los **semiconductores intrínsecos** son semiconductores puros cuya conductividad eléctrica se determina mediante sus propiedades conductivas inherentes. El silicio y el ger-

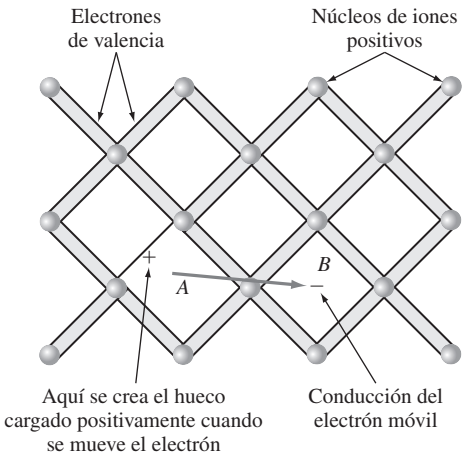


Figura 14.16
Representación bidimensional de la red cúbica de diamante del silicio o el germanio que muestra los núcleos de iones positivos y los electrones de valencia. El electrón se ha excitado desde un enlace en *A* y se ha movido hasta el punto *B*.

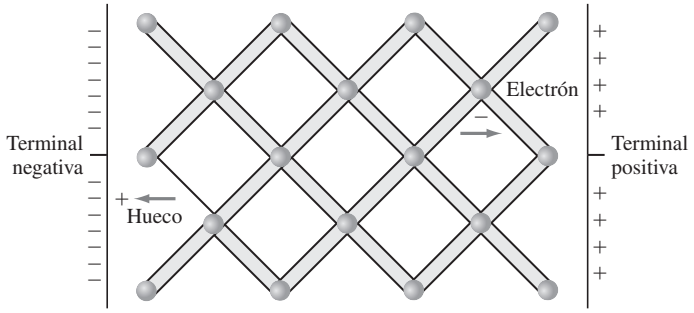


Figura 14.17
Conducción eléctrica en un semiconductor como el silicio que muestra la migración de electrones y huecos en un campo eléctrico aplicado.

manio puros elementales son materiales semiconductores intrínsecos. Estos elementos, que están en el grupo IV A en la tabla periódica, tienen la estructura cúbica de diamante con enlaces covalentes altamente direccionales (figura 14.15). Los orbitales de enlace híbridos sp^3 tetraédricos consistentes en pares de electrones, mantienen unidos a los átomos en una red cristalina. En esta estructura cada átomo de silicio o germanio aporta cuatro electrones de valencia.

La conductividad eléctrica en semiconductores puros tales como Si y Ge se describe de manera cualitativa considerando las dos representaciones gráficas bidimensionales de la red cristalina cúbica de diamante que se muestra en la figura 14.16. Los círculos en esta ilustración representan a los *núcleos de iones positivos* de los átomos de Si o Ge, y los pares de unión de líneas indican *electrones de valencia* de enlace. Los electrones de enlace son incapaces de moverse a través de la retícula cristalina y por ello de conducir electricidad a menos que se proporcione energía suficiente para excitarlos desde sus posiciones de enlace. Cuando se suministra una cantidad crítica de energía a un electrón de valencia para excitarlo más allá de su posición de enlace, éste se vuelve un electrón de conducción libre y deja detrás de él un "hueco" cargado positivamente en la red de cristal (figura 14.16).

14.3.2 Transporte de carga eléctrica en la red cristalina de silicio puro

En el proceso de conducción eléctrica en un semiconductor como el silicio o el germanio puros, tanto los electrones como los huecos son portadores de carga y se mueven en el campo eléctrico aplicado. Los **electrones** de conducción tienen una carga negativa y son atraídos hacia la terminal positiva de un circuito eléctrico (figura 14.17). Los **huecos**, por otro lado, se comportan como cargas positivas y son atraí-

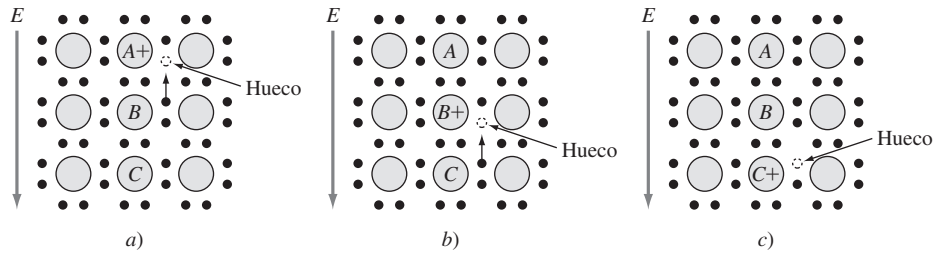


Figura 14.18
Ilustración esquemática del movimiento de huecos y electrones en un semiconductor de silicio puro durante la conducción eléctrica causada por el efecto de un campo eléctrico aplicado.
(Tomado de S. N. Levine, "Principles of Solid State Microelectronics", Holt, 1963.)

dos a la terminal negativa de un circuito eléctrico (figura 14.17). Un hueco tiene una carga positiva igual en magnitud a la carga del electrón.

El movimiento de un "hueco" en un campo eléctrico puede visualizarse haciendo referencia a la figura 14.18. Considérese que existe un hueco en el átomo *A* donde falta un electrón de valencia, como se indica en la figura 14.18*a*. Cuando se aplica un campo eléctrico en la dirección que se muestra en la figura 14.18*a*, se ejerce una fuerza sobre los electrones de valencia del átomo *B*, y uno de los electrones asociados con el átomo *B* se desprenderá de su orbital de enlace y se moverá hacia la vacante en el orbital de enlace del átomo *A*. El hueco aparecerá después en el átomo *B* y, en efecto, se habrá movido de *A* a *B* en la dirección del campo aplicado (figura 14.18*b*). Mediante un mecanismo similar el hueco se transporta desde el átomo *B* hasta *C* mediante un movimiento del electrón de *C* a *A* (figura 14.18*c*). El resultado neto de este proceso es que un electrón se transporta desde *C* hasta *A*, lo cual ocurre en la dirección opuesta al campo aplicado, y un hueco se transporta desde *A* hasta *C*, lo cual sucede en la dirección del campo. De este modo, durante la conducción eléctrica en un semiconductor puro como el silicio, electrones cargados negativamente se mueven en la dirección opuesta al campo aplicado (flujo de corriente convencional) y hacia la terminal positiva, y los huecos cargados positivamente se mueven en la dirección del campo aplicado hacia la terminal negativa.

14.3.3 Diagrama de bandas de energía para semiconductores elementales intrínsecos

Los diagramas de bandas de energía son otro método para describir la excitación de electrones de valencia que se vuelven electrones de conducción en los semiconductores. En esta representación sólo está implicada la energía que se requiere para el proceso, y no se señala ninguna imagen física de los electrones que se mueven en la retícula cristalina. En el diagrama de bandas de energía para semiconductores elementales intrínsecos (por ejemplo, Si o Ge), los electrones de valencia de enlace del cristal ligados en forma covalente ocupan los niveles de energía en la banda de valencia inferior, la cual está casi llena a 20°C (figura 14.19).

Sobre la banda de valencia hay una brecha de energía prohibida en la cual no se permiten estados de energía y que es de 1.1 eV para el silicio a 20°C. Arriba de la brecha de energía hay una banda de conducción casi vacía (a 20°C). A tempera-

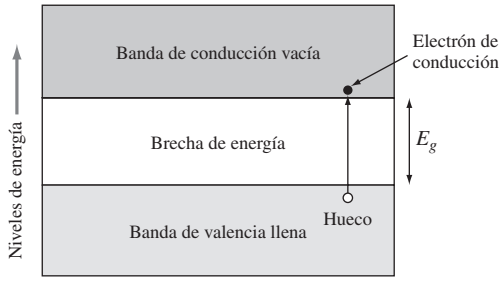


Figura 14.19
Diagrama de bandas de energía de un semiconductor elemental intrínseco como el silicio puro. Cuando un electrón se excita a través de la brecha de energía, se crea un par electrón-hueco. Por tanto, por cada electrón que salta la brecha, se producen dos portadores de carga: un electrón y un hueco.

tura ambiente, la energía térmica es suficiente para excitar algunos electrones desde la banda de valencia hasta la banda de conducción, dejando sitios vacantes o huecos en la banda de valencia. De este modo, cuando un electrón se excita a través de la brecha de energía en la banda de conducción, se crean dos portadores de carga, un electrón cargado negativamente y un hueco cargado positivamente. Ambos electrones y huecos llevan corriente eléctrica.

14.3.4 Relaciones cuantitativas para la conducción eléctrica en semiconductores intrínsecos elementales

Durante la conducción eléctrica en semiconductores intrínsecos, la densidad de corriente **J** es igual a la suma de la conducción debida *tanto a* electrones *como a* huecos. Empleando la ecuación 14.6,

$$\mathbf{J} = nq\boldsymbol{v}_n^* + pq\boldsymbol{v}_p^* \tag{14.9}$$

donde n = número de electrones de conducción por volumen unitario
p = número de huecos de conducción por volumen unitario
q = valor absoluto de la carga del electrón o de los huecos, 1.60×10^{-19} C
$\boldsymbol{v}_n, \boldsymbol{v}_p$ = velocidades de arrastre de electrones y huecos, respectivamente.

Dividiendo ambos lados de la ecuación 14.9 entre el campo eléctrico **E** y utilizando la ecuación 14.4, $\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}$,

$$\sigma = \frac{\mathbf{J}}{\mathbf{E}} = \frac{nq\boldsymbol{v}_n}{\mathbf{E}} + \frac{pq\boldsymbol{v}_p}{\mathbf{E}} \tag{14.10}$$

Las cantidades $\boldsymbol{v}_n/\mathbf{E}$ y $\boldsymbol{v}_p/\mathbf{E}$ se conocen, respectivamente, como *movilidades de electrones* y *huecos*, puesto que miden qué tan rápido se desplazan los electrones y huecos en semiconductores en un campo eléctrico aplicado. Los símbolos μ_n y μ_p

* El subíndice n (para negativo) se refiere a electrones, y el subíndice p (para positivo) se refiere a huecos.

Tabla 14.4 Algunas propiedades físicas del silicio y el germanio a 300 K

	Silicio	Germanio
Brecha de energía, eV	1.1	0.67
Movilidad de electrones μ_n, $m^2/(V \cdot s)$	0.135	0.39
Movilidad de huecos μ_p, $m^2/(V \cdot s)$	0.048	0.19
Densidad de portadores intrínsecos n_i, portadores/m^3	1.5×10^{16}	2.4×10^{19}
Resistividad intrínseca ρ, $\Omega \cdot m$	2300	0.46
Densidad, g/m^3	2.33×10^6	5.32×10^6

Fuente: Tomado de E. M. Conwell, "Properties of Silicion and Germanium II", *Proc. IRE*, junio de 1958, p. 1281.

se usan para las movilidades de electrones y huecos, respectivamente. Sustituyendo las movilidades de electrones y huecos en $\boldsymbol{v}_n/\mathbf{E}$ y $\boldsymbol{v}_p/\mathbf{E}$ en la ecuación 14.10 es posible expresar la conductividad eléctrica de un semiconductor como

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p \tag{14.11}$$

Las unidades para la movilidad μ son

$$\frac{\boldsymbol{v}}{\mathbf{E}} = \frac{\text{m/s}}{\text{V/m}} = \frac{\text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

En semiconductores elementales intrínsecos, los electrones y huecos se crean en pares; de este modo, el número de electrones de conducción es igual al número de huecos producidos, por lo que

$$n = p = n_i \tag{14.12}$$

donde n = concentración de portadores intrínsecos, portadores/volumen unitario.

La ecuación 14.11 se vuelve ahora

$$\sigma = n_i q(\mu_n + \mu_p) \tag{14.13}$$

En la tabla 14.4 se enlistan algunas de las propiedades importantes del silicio y el germanio intrínsecos a 300 K.

Las movilidades de electrones son siempre mayores que las de huecos. Para silicio intrínseco la movilidad de electrones de 0.135 $m^2/(V \cdot s)$ es 2.81 veces mayor que la movilidad de huecos de 0.048 $m^2/(V \cdot s)$ a 300 K (tabla 14.4). El cociente de la movilidad electrón-hueco para el germanio intrínseco es 2.05 a 300 K.

PROBLEMA DE EJEMPLO 14.4

Calcule el número de átomos de silicio por metro cúbico. La densidad del silicio es 2.33 Mg/m^3 (2.33 g/cm^3), y su masa atómica es de 28.08 g/mol.

■ **Solución**

$$\frac{\text{Átomo de silicio}}{\text{m}^3} = \left(\frac{6.023 \times 10^{23} \text{ átomos}}{\text{mol}}\right)\left(\frac{1}{28.08 \text{ g/mol}}\right)\left(\frac{2.33 \times 10^6 \text{ g}}{\text{m}^3}\right)$$

$$= 5.00 \times 10^{28} \text{ átomos/m}^3 \blacktriangleleft$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 14.5

Calcule la resistividad eléctrica de silicio intrínseco a 300 K. Para Si a 300 K, $n_i = 1.5 \times 10^{16}$portadores/m^3, $q = 1.60 \times 10^{-19}$ C, $\mu_n = 0.135$ m^2/(V · s), y $\mu_p = 0.048$ m^2/(V · s).

■ **Solución**

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{n_i q(\mu_n + \mu_p)} \quad \text{(recíproco de la ecuación 14.13)}$$

$$= \frac{1}{\left(\frac{1.5 \times 10^{16}}{\text{m}^3}\right)(1.60 \times 10^{-19}\ \text{C})\left(\frac{0.135\ \text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} + \frac{0.048\ \text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}\right)}$$

$$= 2.28 \times 10^3\ \Omega \cdot \text{m} \blacktriangleleft$$

Las unidades para el recíproco de la ecuación 14.13 son ohm-metros como se muestra mediante la siguiente conversión de unidades:

$$\rho = \frac{1}{n_i q(\mu_n + \mu_p)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\text{m}^3}\right)(\text{C})\left(\frac{1\ \text{A} \cdot \text{s}}{1\ \text{C}}\right)\left(\frac{\text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}\right)\left(\frac{1\ \text{V}}{1\ \text{A} \cdot \Omega}\right)} = \Omega \cdot \text{m}$$

14.3.5 Efecto de la temperatura en la semiconductividad intrínseca

A 0 K las bandas de valencia de semiconductores intrínsecos tales como el silicio y el germanio, están completamente llenas y sus bandas de conducción completamente vacías. A temperaturas por arriba de 0 K, algunos de los electrones de valencia se activan y excitan en forma térmica a través de la brecha de energía hacia la banda de conducción, creando pares electrón-hueco. De tal manera que, en contraste con los metales cuyas conductividades disminuyen con las temperaturas crecientes, las conductividades de los semiconductores *aumentan* con temperaturas en aumento para el intervalo de temperatura sobre el cual predomina este proceso.

Puesto que los electrones se activan de manera térmica en la banda de conducción de semiconductores, la concentración de electrones activados térmicamente en semiconductores muestra una dependencia de la temperatura similar a la de muchos otros procesos activados en forma térmica. Por analogía con la ecuación 5.1, la concentración de electrones con suficiente energía térmica para entrar a la banda de conducción (y crear así las misma concentración de huecos en la banda de valencia), n_i varía de acuerdo con

$$n_i \propto e^{-(E_g - E_{\text{av}})/kT} \tag{14.14}$$

donde E_g = brecha de la banda de energía

E_{prom} =energía promedio a través de la brecha de banda

k = constante de Boltzmann

T = temperatura, K

Para semiconductores intrínsecos como el silicio y el germanio puros, E_{prom} corresponde a la mitad de la brecha, o $E_g/2$. De este modo, la ecuación 14.4 se vuelve

$$n_i \propto e^{-(E_g - E_g/2)/kT} \tag{14.15a}$$

o

$$n_i \propto e^{-E_g/2kT} \tag{14.15b}$$

Puesto que la conductividad eléctrica σ de un semiconductor intrínseco es proporcional a la concentración de portadores de carga eléctrica, n_i, es posible expresar la ecuación 14.15*b* como

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g/2kT} \tag{14.16a}$$

o en forma logaritmo natural,

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2kT} \tag{14.16b}$$

donde σ_0 es una constante total que depende principalmente de las movilidades de los electrones y huecos. La ligera dependencia con la temperatura de σ_0 se despreciará en este libro.

Puesto que la ecuación 14.16*b* es la ecuación de una línea recta, el valor de $E_g/2k$, y en consecuencia E_g, se puede determinar a partir de la pendiente de la gráfica de ln σ *versus* $1/T$, K^{-1}. La figura 14.20 muestra una gráfica experimental de ln σ *versus* $1/T$, K^{-1} para silicio intrínseco.

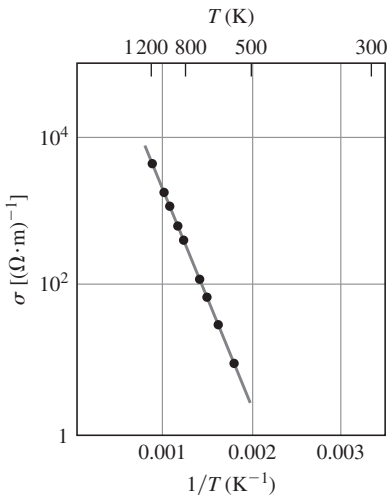


Figura 14.20
Conductividad eléctrica como función de la temperatura recíproca absoluta del silicio intrínseco.
(Tomado de C. A. Pert y R. M. Thomson, "Physics and Solids", 2a. ed., McGraw-Hill, 1970, p. 282.)

PROBLEMA DE EJEMPLO 14.6

La resistividad eléctrica de silicio puro es $2.3 \times 10^3\ \Omega \cdot \text{m}$ a temperatura ambiente, 27°C (300 K). Calcule su conductividad eléctrica a 200°C (473 K). Suponga que E_g del silicio es 1.1 eV; $k = 8.62 \times 10^{-5}$ eV/K.

■ Solución

Para este problema se utiliza la ecuación 14.16*a* y se forman dos ecuaciones simultáneas. Después se elimina σ_0 dividiendo la primera ecuación entre la segunda.

$$\sigma = \sigma_0 \exp \frac{-E_g}{2kT} \qquad \textbf{(14.16}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

$$\sigma_{473} = \sigma_0 \exp \frac{-E_g}{2kT_{473}}$$

$$\sigma_{300} = \sigma_0 \exp \frac{-E_g}{2kT_{300}}$$

Al dividir la primera ecuación por la segunda para eliminar σ_0, se obtiene

$$\frac{\sigma_{473}}{\sigma_{300}} = \exp\left(\frac{-E_g}{2kT_{473}} + \frac{E_g}{2kT_{300}}\right)$$

$$\frac{\sigma_{473}}{\sigma_{300}} = \exp\left[\frac{-1.1\ \text{eV}}{2(8.62 \times 10^{-5}\ \text{eV/K})}\left(\frac{1}{473\ \text{K}} - \frac{1}{300\ \text{K}}\right)\right]$$

$$\ln \frac{\sigma_{473}}{\sigma_{300}} = 7.777$$

$$\sigma_{473} = \sigma_{300}(2\,385)$$

$$= \frac{1}{2.3 \times 10^3\ \Omega \cdot \text{m}}(2\,385) = 1.04\ (\Omega \cdot \text{m})^{-1} \blacktriangleleft$$

La conductividad eléctrica del silicio se incrementó casi 2 400 veces cuando la temperatura fue elevada de 27 a 200°C.

14.4 SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS

Los *semiconductores extrínsecos* son soluciones sólidas sustitucionales muy diluidas en las cuales los átomos de impureza del soluto tienen diferentes características de valencia respecto de la red atómica del disolvente. Las concentraciones de los átomos de impurezas agregados en estos semiconductores suelen encontrarse en el intervalo de 100 a 1 000 partes por millón (ppm).

14.4.1 Semiconductores extrínsecos tipo n (tipo negativo)

Considérese el modelo de enlace covalente bidimensional para la red cristalina de silicio que se muestra en la figura 14.21*a*. Si un átomo de impureza de un elemento del grupo V-A, tal como el fósforo, sustituye al átomo de silicio, que es un elemento del grupo IV-A, existirá un exceso de electrones por arriba de los cuatro que se necesitan para el enlace covalente tetraédrico en la retícula de silicio. Este electrón adicional sólo está ligado débilmente al núcleo de fósforo con carga positiva y

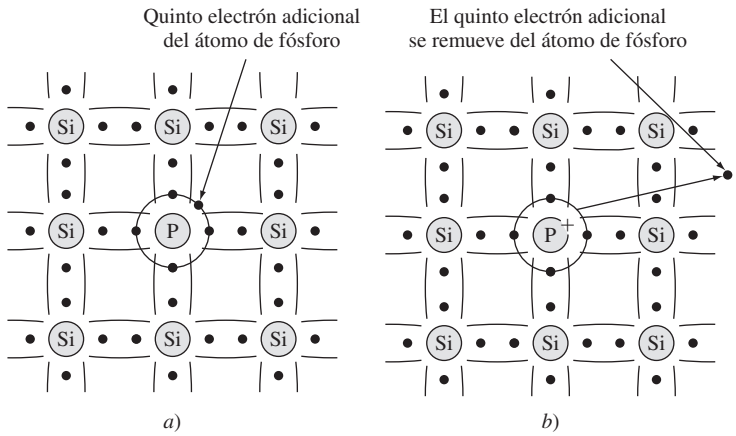


Figura 14.21
a) La adición de un átomo de impureza de fósforo pentavalente a la red de silicio tetravalente proporciona un quinto electrón que está unido débilmente al átomo de fósforo base. Sólo una pequeña cantidad de energía (0.044 eV) hace que este electrón sea móvil y conductor. *b*) Bajo un campo eléctrico aplicado el electrón de exceso se vuelve conductivo y es atraído a la terminal positiva del circuito eléctrico. Con la pérdida del electrón adicional, el átomo de fósforo se ioniza y adquiere una carga +1.

tiene una energía de enlace de 0.044 eV a 27°C. Esta energía es casi 5 por ciento de la que se requiere para que un electrón de conducción brinque la brecha de energía de 1.1 eV de silicio puro. Esto es, sólo se requiere 0.044 eV de energía para eliminar el electrón de exceso de su núcleo de manera que pueda participar en la conducción eléctrica. Cuando está bajo la acción de un campo eléctrico, el electrón adicional se vuelve un electrón libre disponible para conducción y el restante átomo de fósforo se ioniza y adquiere una carga positiva (figura 14.21*b*).

Los átomos de impureza del grupo V-A como el P, As y Sb cuando se agregan al silicio o germanio, proporcionan electrones que se ionizan con facilidad para la conducción eléctrica. Puesto que estos átomos de impureza del grupo V-A donan electrones de conducción cuando están presentes en cristales de silicio o germanio, reciben el nombre de *átomos de impurezas donadoras*. Los semiconductores de silicio o germanio que contienen átomos de impurezas de grupo V reciben el nombre de **semiconductores extrínsecos tipo n** (**tipo negativo**) puesto que la mayoría de los portadores de carga son electrones.

En términos del diagrama de bandas de energía del silicio, el electrón adicional del átomo de impurezas del grupo V-A ocupa un nivel de energía en la brecha de energía prohibida justo apenas por debajo de la banda de conducción vacía, como se muestra en la figura 14.22. Tal nivel de energía se denomina **nivel de donador**, puesto que éste es proporcionado por un átomo de impurezas donador. Un átomo de impurezas donador del grupo V-A, luego de perder su electrón adicional, se ioniza y adquiere una carga positiva. Los niveles de energía para los átomos donadores de impurezas del grupo V-A Sb, P y As en el silicio se muestran el la figura 14.23.

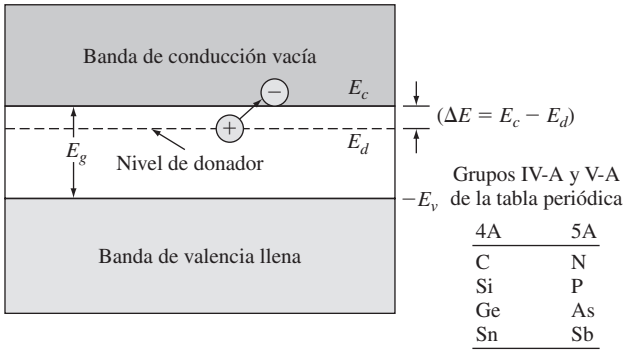


Figura 14.22
Diagrama de bandas de energía para un semiconductor extrínseco tipo *n* que demuestra la posición del nivel de donador para el electrón adicional de un elemento del grupo V-A como el P, As y Sb que está contenido en la red cristalina de silicio (figura 14.21*a*). Los electrones en el nivel de energía del donador requieren sólo una pequeña cantidad de energía ($\Delta E = E_c - E_d$) para excitarlos a la banda de conducción. Cuando el electrón adicional en el nivel del donador salta a la banda de conducción, un ion inmóvil positivo queda detrás.

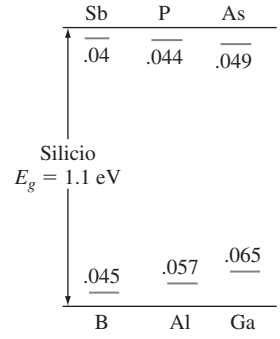


Figura 14.23
Energías de ionización (en electrón voltios) de diversas impurezas en silicio.

14.4.2 Semiconductores extrínsecos tipo p (tipo positivo)

Cuando un elemento trivalente del grupo III-A, como el boro, se introduce en forma sustitucional en la retícula del silicio ligada tetraédricamente, se pierde uno de los orbitales de enlace, y existe un hueco en la estructura de enlace del silicio (figura 14.24*a*). Si se aplica un campo eléctrico externo al cristal de silicio, uno de los electrones vecinos de otro enlace tetraédrico puede alcanzar suficiente energía para desprenderse de su enlace y moverse hacia el enlace faltante (hueco) del átomo de boro (figura 14.24*b*). Cuando el hueco asociado con el átomo de boro se llena mediante un electrón del átomo de silicio vecino, el átomo de boro se ioniza y adquiere una carga negativa de –1. La energía de enlace asociada con la remoción de un electrón de un átomo de silicio, formando de ese modo un hueco, y la transferencia subsiguiente del electrón al átomo de boro es sólo de 0.045 eV. Esta cantidad de energía es pequeña comparada con la de 1.1 eV que se requiere para transferir un electrón desde la banda de valencia hasta la banda de conducción. En la presencia de un campo eléctrico aplicado, el hueco creado por la ionización del átomo de boro se comporta como un portador de carga positiva y migra en la red de silicio hacia la terminal negativa, como se describe en la figura 14.17.

En términos del diagrama de bandas de energía, el átomo de boro proporciona un nivel de energía llamado **nivel de aceptor** que es un poco mayor (≈ 0.045 eV) que el nivel más alto de la banda de valencia llena del silicio (figura 14.25). Cuando un electrón de valencia de un átomo de silicio cerca de un átomo de boro llena un hueco del electrón faltante en una banda de valencia de boro-silicio (figura 14.24*b*), este electrón se eleva al nivel de aceptor y crea un ion de boro negativo. En este

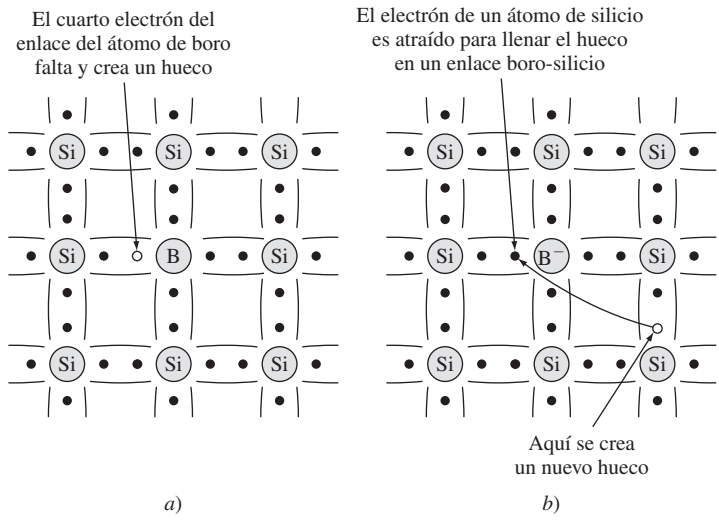


Figura 14.24
a) La adición de un átomo de impurezas de boro trivalente en la red tetravalente crea un hueco en uno de los enlaces boro-silicio puesto que falta un electrón.
b) Bajo un campo eléctrico aplicado sólo una pequeña cantidad de energía (0.045 eV) atrae a un electrón de un átomo de silicio cercano para llenar este hueco, creando de esta manera un ion de boro inmóvil con una carga de −1. El nuevo hueco creado en la red de silicio actúa como un portador de carga positiva y es atraído a la terminal negativa de un circuito eléctrico.

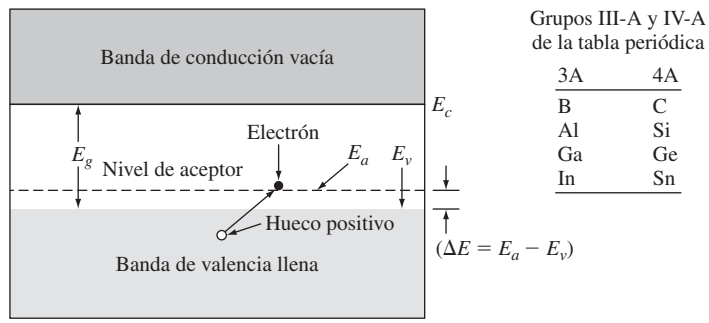


Figura 14.25
Diagrama de bandas de energía de un semiconductor extrínseco tipo p que muestra la posición del nivel de aceptor creado por la adición de un átomo de un elemento del grupo III-A, como el Al, B o Ga, para sustituir un átomo de silicio en la red de este mismo (figura 14.24). Sólo se requiere una pequeña cantidad de energía ($\Delta E = E_a - E_v$) para excitar un electrón desde la banda de valencia hasta el nivel aceptor, lo que crea un hueco de electrón (portador de cargas) en la banda de valencia.

proceso se crea un hueco de electrón en la red de silicio que actúa como un portador de carga positivo. Átomos de elementos de grupo III-A tales como B, Al y Ga proporcionan niveles de aceptor en semiconductores de silicio y reciben el nombre

de *átomos aceptores*. Puesto que los portadores mayoritarios en estos semiconductores extrínsecos son huecos en la estructura de la banda de valencia, éstos se denominan **semiconductores extrínsecos tipo p** (**tipo portador positivo**).

14.4.3 Impurificación de material semiconductor de silicio extrínseco

El proceso de agregar pequeñas cantidades de átomos de impureza sustitucionales al silicio para producir material semiconductor de silicio extrínseco se denomina *impurificación,* en tanto que los propios átomos de impurezas reciben el nombre de *impurificadores.* El método de impurificación de semiconductores de silicio que se usa más comúnmente es el *proceso de plano*. En éste, los átomos impurificadores se introducen en áreas seleccionadas de silicio desde una superficie para formar regiones de material tipo p o tipo n. Las obleas suelen medir alrededor de 4 pulgadas (10 cm) de diámetro y casi unos cuantos cientos de micrómetros[3] de espesor. En la figura 4.13 se muestran algunas de estas obleas de silicio.

En el proceso de difusión para impurificar obleas de silicio, los átomos impurificadores se depositan por lo común sobre o cerca de la superficie de la oblea mediante un depósito gaseoso, seguido por una difusión hacia el interior que dispersa a los átomos donadores dentro de la oblea. Se requiere una alta temperatura de casi 1 100°C en este proceso de difusión. En la sección 16.6 sobre microelectrónica se describirán más detalles de este proceso.

14.4.4 Efecto de la impurificación en concentraciones de portadores en semiconductores extrínsecos

La ley acción de masas En semiconductores como el silicio y el germanio, los electrones y huecos móviles se generan y recombinan de manera constante. A temperatura constante en condiciones de equilibrio el producto de los electrones libres negativos y las concentraciones de huecos positivos es una constante. La relación general es

$$np = n_i^2 \tag{14.17}$$

donde n_i es la concentración intrínseca de portadores en un semiconductor y es una constante a una temperatura dada. Esta relación es válida tanto para semiconductores intrínsecos como extrínsecos. En un semiconductor extrínseco el aumento en un tipo de portador (n o p) reduce la concentración del otro mediante recombinación, de manera que el producto de los dos (n y p) es una constante a cualquier temperatura dada.

Los portadores cuya concentración en semiconductores extrínsecos es la mayor, se denominan **portadores mayoritarios**, y aquellos cuya concentración es la más pequeña reciben el nombre de **portadores minoritarios** (véase la tabla 14.5). La concentración de electrones en un semiconductor tipo n se denota mediante n_n, y la de huecos en un material tipo n, por medio de p_n. De modo similar, la concentración de huecos en un semiconductor tipo p está dada por p_p y la de electrones en el material tipo p por n_p.

Densidades de carga en semiconductores extrínsecos Una segunda relación fundamental para semiconductores extrínsecos se obtiene del hecho de que el cristal to-

[3] 1 micrómetro (μm) = 10^{-4} cm = 10^4 Å.

Tabla 14.5 Resumen de concentraciones de portadores en semiconductores extrínsecos

Semiconductor	Concentraciones de portadores mayoritarios	Concentraciones de portadores minoritarios
tipo n	n_n (concentración de electrones en material tipo n)	p_n (concentración de huecos en material tipo n)
tipo p	p_p (concentración de huecos en material tipo p)	n_p (concentración de electrones en material tipo p)

tal debe ser eléctricamente neutro. Esto significa que la densidad de carga en cada elemento de volumen debe ser cero. Hay dos tipos de partículas cargadas en semiconductores extrínsecos tales como Si y Ge: iones inmóviles y portadores de carga móviles. Los iones inmóviles se originan de la ionización de átomos de impureza donadores o aceptores en el Si o Ge. Las concentraciones de los iones donadores positivos se denotan mediante N_d, y las de los iones aceptores negativos mediante N_a. Los portadores de carga móvil se originan sobre todo de la ionización de los átomos de impureza en el Si o Ge, y sus concentraciones se indican mediante n para los electrones cargados negativamente y p para los huecos cargados positivamente.

Puesto que el semiconductor debe ser eléctricamente neutro, la magnitud de la densidad de carga negativa total debe ser igual a la densidad de la carga positiva total. La densidad de carga negativa total es igual a la suma de los iones aceptores negativos N_a y los electrones, o $N_a + n$. La densidad de carga positiva total es igual a la suma de los iones donadores positivos N_d y los huecos, o $N_d + p$. De este modo,

$$N_a + n = N_d + p \tag{14.18}$$

En un semiconductor tipo n creado al sumar átomos de impureza donadores al silicio intrínseco, $N_a = 0$. Puesto que el número de electrones es mucho mayor que el número de huecos en un semiconductor tipo n (esto es, $n \gg p$), entonces la ecuación 14.18 se reduce a

$$n_n \approx N_d \tag{14.19}$$

Así, en un semiconductor tipo n la concentración de electrones libres es casi igual a la concentración de átomos donadores. La concentración de huecos en un semiconductor tipo n se obtiene de la ecuación 14.17. En tal caso,

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \approx \frac{n_i^2}{N_d} \tag{14.20}$$

Las ecuaciones correspondientes para semiconductores tipo p de silicio y germanio son

$$p_p \approx N_a \tag{14.21}$$

y

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_a} \tag{14.22}$$

Concentraciones típicas de portadores en semiconductores intrínsecos y extrínsecos Para silicio a 300 K la concentración de portadores intrínsecos 1.5×10^{16} es igual a portadores/m^3. Para silicio extrínseco impurificado con arsénico a una concentración típica de 10^{21} átomos de impurezas/m^3,

$$\text{concentración de portadores mayoritarios } n_n = 10^{21} \text{ electrones/m}^3$$

$$\text{concentración de portadores minoritarios } p_n = 2.25 \times 10^{11} \text{ huecos/m}^3$$

De este modo, en semiconductores extrínsecos la concentración de portadores mayoritarios es por lo común mucho mayor que la de los portadores minoritarios. El problema de ejemplo 14.7 muestra cómo las concentraciones de portadores mayoritarios y minoritarios puede calcularse para un semiconductor de silicio extrínseco.

PROBLEMA DE EJEMPLO 14.7

Una oblea de silicio se impurifica con 10^{21} átomos de fósforo/m^3. Calcule *a*) la concentración de portadores mayoritarios, *b*) la concentración de portadores minoritarios y *c*) la resistividad eléctrica del silicio impurificado a temperatura ambiente (300 K). Suponga ionización completa de los átomos impurificadores; $n_i(\text{Si}) = 1.5 \times 10^{16}\ \text{m}^{-3}$, $\mu_n = 0.135\ \text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, y $\mu_p = 0.048\ \text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$.

■ Solución

Puesto que el silicio está impurificado con fósforo, un elemento del grupo V, el silicio impurificado es tipo *n*.

a)
$$n_n = N_d = 10^{21} \text{ electrones/m}^3 \blacktriangleleft$$

b)
$$p_n = \frac{n_i^2}{N_d} = \frac{(1.5 \times 10^{16}\ \text{m}^{-3})^2}{10^{21}\ \text{m}^{-3}} = 2.25 \times 10^{11} \text{ huecos/m}^3 \blacktriangleleft$$

c)
$$\rho = \frac{1}{q\mu_n n_n} = \frac{1}{(1.60 \times 10^{-19}\ \text{C})\left(0.135 \dfrac{\text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}\right)\left(\dfrac{10^{21}}{\text{m}^3}\right)}$$

$$= 0.0463\ \Omega \cdot \text{m}^* \blacktriangleleft$$

*Véase el problema de ejemplo 14.5 para la conversión de unidades.

PROBLEMA DE EJEMPLO 14.8

Una oblea de silicio impurificada con fósforo tiene una resistividad eléctrica de $8.33 \times 10^{-5}\ \Omega \cdot \text{m}$ a 27°C. Suponga que las movilidades de los portadores de carga son las constantes $0.135\ \text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ para electrones y $0.048\ \text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ para huecos.

a) ¿Cuál es la concentración de portadores mayoritarios (portadores por metro cúbico) si se supone ionización completa?

b) ¿Cuál es el cociente entre átomos de fósforo y silicio en este material?

■ Solución

a) El fósforo produce un semiconductor de silicio tipo n. Por tanto, la movilidad de los portadores de carga se supondrá que es la de electrones en silicio a 300 K, la

cual corresponde a $0.1350\ m^2/(V \cdot s)$. De este modo,

$$\rho = \frac{1}{n_n q \mu_n}$$

o
$$n_n = \frac{1}{\rho q \mu_n} = \frac{1}{(8.33 \times 10^{-5}\ \Omega \cdot m)(1.60 \times 10^{-19}\ C)[0.1350\ m^2/(V \cdot s)]}$$
$$= 5.56 \times 10^{23}\ \text{electrones/m}^3 \blacktriangleleft$$

b) Suponiendo que cada átomo de fósforo proporciona un electrón portador de carga, habrá 5.56×10^{23} átomos de fósforo/m^3 en el material. El silicio puro contiene 5.00×10^{28} átomos m^3 (problema de ejemplo 14.4). De este modo, la proporción entre átomos de fósforo y silicio será

$$\frac{5.56 \times 10^{23}\ \text{P átomos/m}^3}{5.00 \times 10^{28}\ \text{Si átomos/m}^3} = 1.11 \times 10^{-5}\ \text{átomos de P y Si} \blacktriangleleft$$

14.4.5 Efecto de la concentración de impurezas ionizadas total en la movilidad de portadores de carga en silicio a temperatura ambiente

En la figura 14.26 se muestra que las movilidades de electrones y huecos en silicio a temperatura ambiente están en un máximo a bajas concentraciones de impurezas y que luego disminuyen con la concentración de impurezas, llegando al valor mínimo a concentraciones elevadas. El problema de ejemplo 14.9 muestra cómo neutralizando un tipo de portador de carga con otro lleva a una movilidad inferior de los portadores mayoritarios.

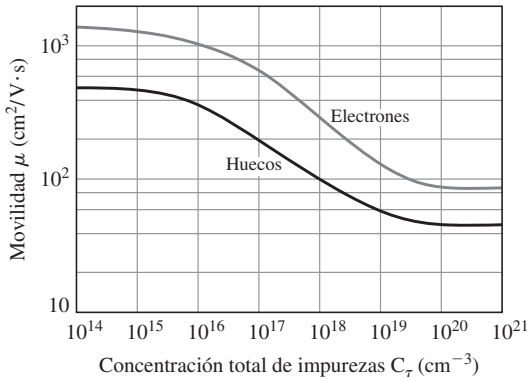


Figura 14.26
El efecto de una concentración de impurezas ionizadas total en la movilidad de los portadores de carga en silicio a temperatura ambiente.
(Tomado de A. S. Grove, "Physics and Technology of Semiconductor Devices", Wiley, 1967, p. 110.)

PROBLEMA DE EJEMPLO 14.9

Un semiconductor de silicio a 27°C se impurifica con 1.4×10^{16} átomos de boro/cm^3 más 1.0×10^{16} átomos de fósforo/cm^3. Calcule *a*) las concentraciones de equilibrio de electrones y huecos, *b*) las movilidades de electrones y huecos y *c*) la resistividad eléctrica. Suponga ionización completa de los átomos impurificados. n_i (Si) $= 1.50 \times 10^{10}$ cm^{-3}.

■ Solución

a) *Concentración de portadores mayoritarios:* La concentración neta de iones inmóviles es igual a la concentración de iones aceptores menos la concentración de iones donadores. En tal caso,

$$p_p \simeq N_a - N_d = 1.4 \times 10^{16}\ \text{B átomos/cm}^3 - 1.0 \times 10^{16}\ \text{átomos de P/cm}^3$$
$$\simeq N_a \simeq 4.0 \times 10^{15}\ \text{huecos/m}^3 \blacktriangleleft$$

Concentración de portadores minoritarios: Los electrones son los portadores minoritarios. Por tanto,

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_a} = \frac{(1.50 \times 10^{10}\ \text{cm}^{-3})^2}{4 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}} = 5.6 \times 10^4\ \text{electrones/m}^3 \blacktriangleleft$$

b) *Movilidades de electrones y huecos:* Para electrones, utilizando la concentración total de impurezas $C_T = 2.4 \times 10^{16}$ iones/cm^3 y la figura 14.26,

$$\mu_n = 900\ \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s}) \blacktriangleleft$$

Para huecos, empleando $C_T = 2.4 \times 10^{16}$ iones/cm^3 y la figura 14.26,

$$\mu_p = 300\ \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s}) \blacktriangleleft$$

c) *Resistividad eléctrica:* El semiconductor impurificado es de tipo p:

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p p_p}$$
$$= \frac{1}{(1.60 \times 10^{-19}\ \text{C})[300\ \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})](4.0 \times 10^{15}/\text{cm}^3)}$$
$$= 5.2\ \Omega \cdot \text{cm} \blacktriangleleft$$

14.4.6 Efecto de la temperatura en la conductividad eléctrica de semiconductores extrínsecos

La conductividad eléctrica de un semiconductor extrínseco, tal como el silicio que contiene átomos de impureza que a su vez se han impurificado, resulta afectada por la temperatura, como se muestra de manera esquemática en la figura 14.27. A temperaturas más bajas el número de átomos de impureza por volumen unitario activado (ionizado) determina la conductividad eléctrica del silicio. Cuando aumenta la temperatura, más y más átomos de impureza se ionizan y, en consecuencia, aumenta la conductividad eléctrica del silicio extrínseco con el incremento de la temperatura en el intervalo extrínseco (figura 14.27).

En este intervalo extrínseco sólo se requiere una cantidad más o menos pequeña de energía (≈ 0.04 eV) para ionizar los átomos de impureza. La cantidad de energía necesaria para excitar un electrón donador en la banda de conducción en el si-

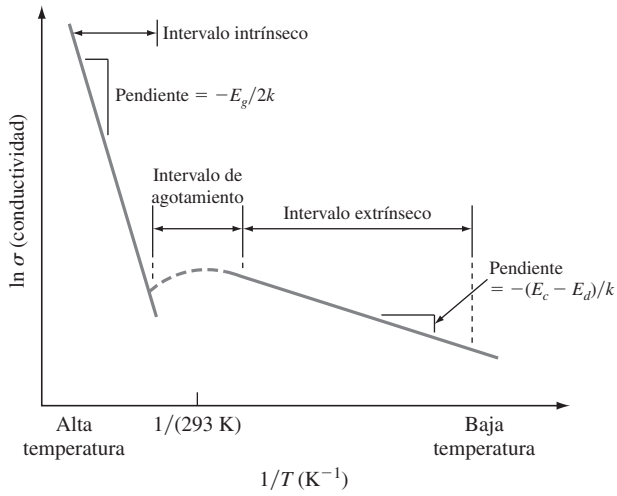


Figura 14.27
Gráfica esquemática de σ (conductividad) en función de $1/T$ (K^{-1}) para un semiconductor extrínseco de tipo *n*.

licio tipo n es $E_c - E_d$ (figura 14.22). De esta forma, la pendiente de σ en función de $1/T$ (K^{-1}) para silicio tipo n es $-(E_c - E_d)/k$. De manera correspondiente, la energía que se requiere para excitar un electrón en el silicio tipo p en un nivel de aceptor y para crear de ese modo un hueco en la banda de valencia es $E_a - E_v$. En consecuencia, la pendiente de ln σ en función de $1/T$ (K^{-1}) para silicio tipo p es $-(E_a - E_v)/k$ (figura 14.27).

Para cierto intervalo de temperatura superior que se requiere para la ionización completa, un incremento en la temperatura no cambia de manera sustancial la conductividad eléctrica del semiconductor extrínseco. En un semiconductor tipo n este intervalo de temperatura se conoce como el *intervalo de agotamiento*, pues los átomos del donador se vuelven completamente ionizados después de la pérdida de sus electrones de donador (figura 14.27). En semiconductores tipo p este intervalo se denomina *intervalo de saturación*, pues los átomos aceptores se ionizan por completo con electrones de aceptor. Para proporcionar un intervalo de agotamiento cerca de la temperatura ambiente (300 K), el silicio impurificado con arsénico requiere alrededor de 10^{21} portadores/m^3 (figura 14.28*a*). Los intervalos de temperatura de agotamiento de donadores y de saturación de aceptores son importantes para los dispositivos semiconductores, pues éstos proporcionan intervalos de temperatura que tienen conductividades eléctricas esencialmente constantes para la operación.

Cuando se incrementa la temperatura más allá del intervalo de agotamiento, se presenta el intervalo intrínseco. Las temperaturas más altas proporcionan energías de activación suficientes para que los electrones salten la brecha del semiconductor (1.1 eV para silicio) de modo que la conducción intrínseca se vuelve dominante. La pendiente de la gráfica σ *versus* $1/T$ (K^{-1}) se vuelve mucho más inclinada y es $-E_g/2k$. En el caso de semiconductores base silicio con una brecha de energía de 1.1 eV, es posible recurrir a la conducción extrínseca hasta una temperatura de casi 200°C. El

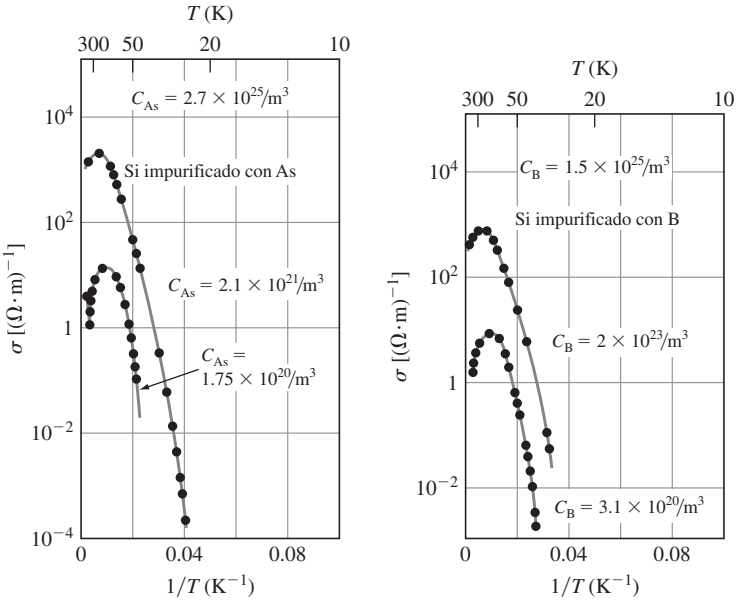


Figura 14.28
a) Gráfica de σ en función de $1/T\ (K^{-1})$ para Si impurificado con As. En el nivel más bajo de impurezas la contribución intrínseca es ligeramente visible a las temperaturas más altas; la pendiente de la línea a 40 K produce $E_i = 0.048$ eV. *b*) Gráfica de σ para $1/T$ (K^{-1}) Si impurificado con B. La pendiente de la línea por debajo de 50 K produce $E_i = 0.043$ eV.
(Tomado de C. A. Wert y R. M. Thomson, "Physics of Solids", 2a. ed., McGraw-Hill, 1970, p. 282.)

límite superior para el uso de la conducción extrínseca está determinado por la temperatura a la cual la conductividad intrínseca se vuelve importante.

14.5 DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

El uso de semiconductores en la industria electrónica se ha vuelto cada vez más importante. La capacidad de los fabricantes de semiconductores para poner circuitos eléctricos extremadamente complejos en un solo chip de silicio de casi 1 cm^2 o menos y alrededor de 200 μm de espesor, ha revolucionado el diseño y la manufactura de incontables productos. Un ejemplo de la circuitería electrónica compleja que es posible poner en un chip de silicio de un microprocesador avanzado o "computadora en un chip" se muestra en la figura 14.1. El microprocesador constituye la base de muchos de los productos más recientes que utilizan la miniaturización progresiva de la tecnología de semiconductores basada en silicio.

En esta sección se estudiarán primero las interacciones electrón-hueco en una unión pn y se examinará después el funcionamiento del diodo de unión pn. Se considerarán después algunas aplicaciones de los diodos con este tipo de unión. Finalmente, se examinará de manera breve la operación del transistor de unión bipolar.

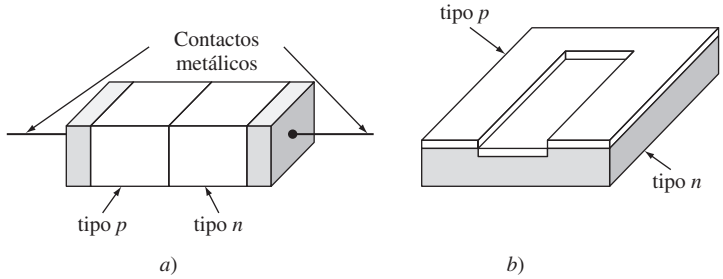


Figura 14.29
a) Diodo de unión pn crecido en la forma de una barra de un monocristal. *b*) Unión pn plana formada difundiendo de manera selectiva una impureza tipo *p* en un cristal semiconductor tipo *n*.

14.5.1 La unión pn

Los dispositivos semiconductores más comunes dependen de las propiedades de la frontera entre los materiales tipo p y tipo n y, en consecuencia, se examinarán algunas de las características de esta frontera. Un diodo de unión pn puede producirse haciendo crecer un solo cristal de silicio intrínseco e impurificándolo primero con material de tipo n y después con material de tipo p (figura 14.29*a*). Sin embargo, de manera más común, la unión pn se produce por la difusión en estado sólido de un tipo de impureza (por ejemplo, tipo p) en material tipo n existente (figura 14.29*b*).

El diodo de unión pn en equilibrio Se considerará un caso ideal en el cual se unen semiconductores de silicio tipo p y tipo n para formar una unión. Antes de ésta, ambos tipos de semiconductores son eléctricamente neutros. En el material tipo p los huecos son los portadores mayoritarios y los electrones los portadores minoritarios. En el material tipo n los electrones son los portadores mayoritarios y los huecos los minoritarios.

Después de unir los materiales tipo p y n (es decir, después de que se forma la **unión pn** en la fabricación real), los portadores mayoritarios cerca o en la unión se difunden a través de la misma y se recombinan (figura 14.30*a*). Puesto que los iones restantes cerca o en la unión son físicamente más grandes y pesados que los electrones y huecos, permanecen en sus posiciones en la retícula de silicio (figura 14.30*b*). Después de unas cuantas recombinaciones de portadores mayoritarios en la unión, el proceso se interrumpe debido a que los iones negativos grandes repelen a los electrones que cruzan la unión en el material tipo p. De manera similar, los huecos que cruzan la unión se repelen por causa de los iones positivos grandes en el material tipo n. Los iones inmóviles en la unión crean una zona agotada de portadores mayoritarios que se conoce como *región de agotamiento*. En condiciones de equilibrio (esto es, condiciones de circuito abierto) existe ahí una diferencia de potencial o barrera para el flujo de portadores mayoritarios. De este modo, no hay flujo de corriente neta en las condiciones de circuito abierto.

El diodo de unión pn polarizado inversamente Cuando se aplica un voltaje externo a una unión pn, se dice que ésta está **polarizada**. Se considerará el efecto de aplicar un voltaje externo de una batería a la unión pn. Se dice que la unión pn está **inversamente polarizada** si el material tipo n de la unión se conecta a la termi-

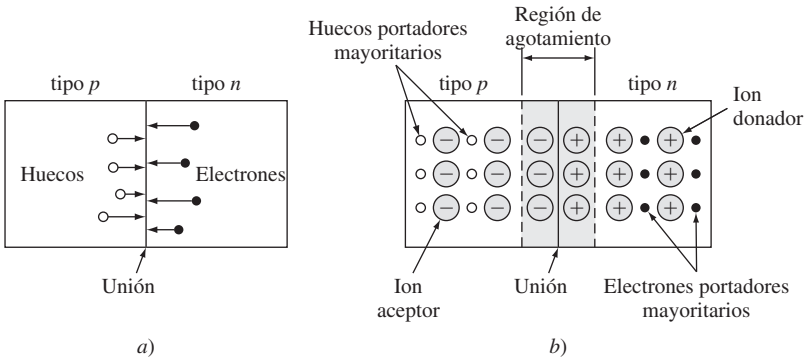


Figura 14.30
a) Diodo de unión pn que muestra los portadores mayoritarios (huecos en el material tipo *p* y electrones en el material tipo *n*) difundiéndose hacia la unión. *b*) Formación de la región de agotamiento en y cerca de la unión *pn* debido a la pérdida de portadores mayoritarios en esta región por recombinación. Sólo permanecen iones en esta región en sus posiciones en la estructura cristalina.

nal positiva de la batería y si el material tipo p se conecta a la terminal negativa (figura 14.31). Con este arreglo, los electrones (portadores mayoritarios) del material tipo n son atraídos a la terminal positiva de la batería lejos de la unión y los huecos (portadores mayoritarios) del material tipo p son atraídos a la terminal negativa de la batería lejos de la unión (figura 14.31). El movimiento de los electrones y huecos de los portadores mayoritarios lejos de la unión aumenta su ancho de barrera, y como resultado la corriente que se produce a partir de los portadores mayoritarios no circulará. Sin embargo, los portadores minoritarios generados térmicamente (huecos en el material tipo n y electrones en el material tipo p) serán arrastrados hacia la unión de manera que puedan combinarse y crear un flujo de corriente muy pequeño bajo condiciones de polarización inversa. Esta minoría o *corriente de fuga* suele ser del orden de microamperes (μA) (figura 14.32).

El diodo de unión pn polarizado directamente El diodo de unión pn se dice que está **polarizado directamente** si el material tipo n de la unión se conecta a la terminal negativa de una batería externa (u otra fuente eléctrica) y si el material tipo p se conecta a la terminal positiva (figura 14.33). En este arreglo los portadores mayoritarios se repelen hacia la unión y pueden combinarse; esto es, los electrones se repelen lejos de la terminal negativa de la batería hacia la unión y los huecos se repelen alejándose de la terminal positiva hacia la unión.

En el caso de polarización directa —esto es, polarización directa con respecto a los portadores mayoritarios— la barrera de energía en la unión se reduce de manera que algunos electrones y huecos pueden cruzar la unión y recombinarse subsecuentemente. Durante la polarización directa de una unión pn, los electrones de la batería entran en el material negativo del diodo (figura 14.33). Por cada electrón que cruza la unión y se recombina con un hueco, entra otro electrón desde la batería. Además, para cada hueco que se recombina con un electrón en el material tipo n, se forma un nuevo hueco siempre que un electrón deja el material tipo p y fluye hacia la termi-

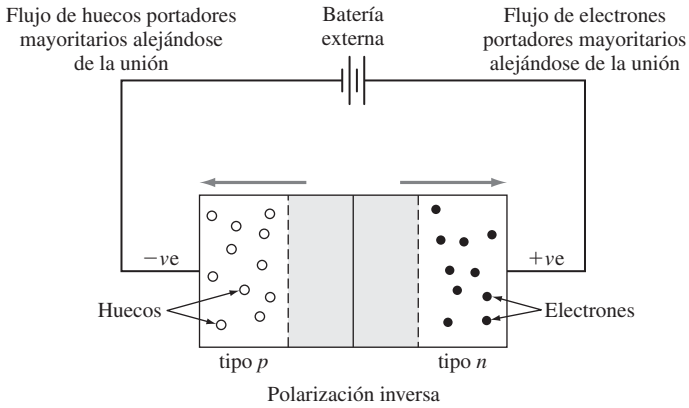


Figura 14.31
Diodo de unión pn polarizado inversamente. Los portadores mayoritarios son atraídos lejos de la unión, creando una región de agotamiento más ancha que cuando la unión está en equilibrio. El flujo de corriente debido a los portadores mayoritarios se reduce casi a cero. Sin embargo, los portadores minoritarios están polarizados directamente, lo que crea una pequeña corriente de fuga, como se ilustra en la figura 14.32.

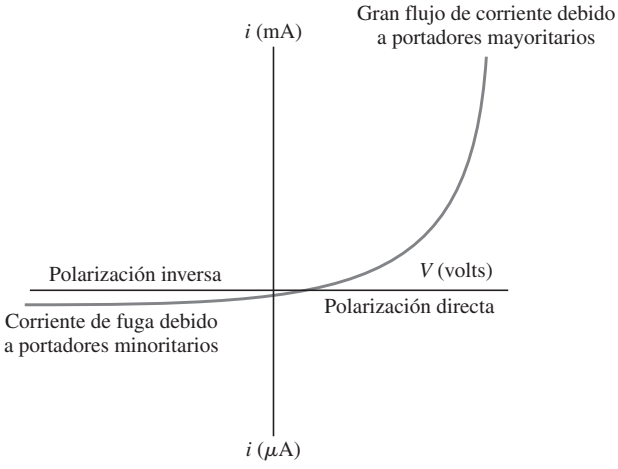


Figura 14.32
Diagrama esquemático de las características de corriente-voltaje de un diodo de unión *pn*. Cuando el diodo de unión pn está polarizado inversamente, existe una corriente de fuga debido a la combinación de los portadores minoritarios. Cuando el diodo de unión pn se polariza directamente, fluye una gran corriente debido a la recombinación de los portadores mayoritarios.

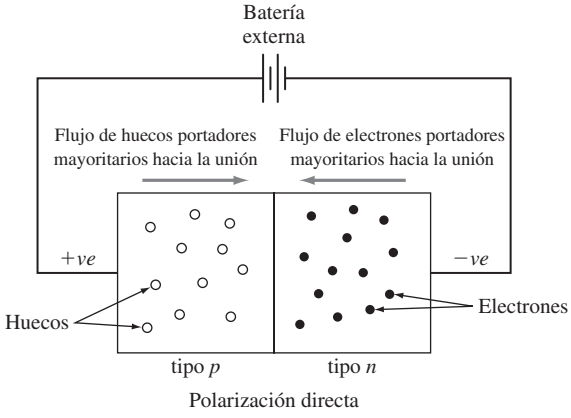


Figura 14.33
Diodo de unión *pn* polarizado directamente. Los portadores mayoritarios se repelen hacia la unión y la cruzan para recombinarse de manera que fluye una corriente considerable.

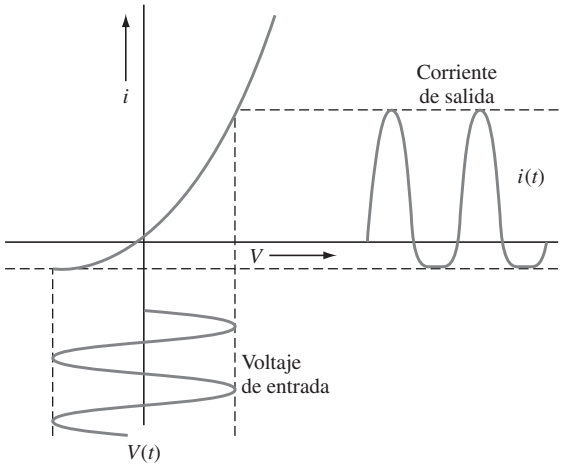


Figura 14.34
Diagrama de voltaje-corriente que ilustra la acción rectificadora de un diodo de unión pn que convierte corriente alterna (CA) en corriente directa (CD). La corriente de salida no es del todo corriente directa pero es en gran parte positiva. Esta señal de CD puede suavizarse utilizando otros dispositivos electrónicos.

nal positiva de la batería. Puesto que la barrera de energía para el flujo de electrones se reduce cuando la unión pn está polarizada directamente, es posible que fluya una corriente considerable, como se indica en la figura 14.32. El flujo de electrones (y en consecuencia, el flujo de corriente) puede continuar siempre que la unión pn esté polarizada directamente y la batería proporcione una fuente de electrones.

14.5.2 Algunas aplicaciones de los diodos de unión pn

Diodos rectificadores Una de las aplicaciones más importantes de los diodos de unión pn es convertir voltaje alterno en voltaje directo, proceso que se conoce como *rectificación*. Los diodos que se utilizan en este proceso reciben el nombre de **diodos rectificadores**. Cuando una señal de CA se aplica a un diodo de unión pn, el diodo conducirá sólo cuando la región p tenga un voltaje positivo aplicado a ella con relación a la región n. En consecuencia, se producirá rectificación de media onda, como se ilustra en la figura 14.34. Esta señal de salida puede alisarse con otros dispositivos y circuitos electrónicos de manera que sea posible producir una señal de CD estable. Los rectificadores de silicio de estado sólido se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones que requieren desde décimos de ampere hasta cientos de amperes o más. Los voltajes, también, pueden ser tan altos como 1 000 V o valores superiores. En la figura 14.35 se presentan algunos ejemplos de los rectificadores del diodo de silicio.

Diodos de ruptura Los diodos de ruptura, o *diodos zener* como algunas veces se les llama, son rectificadores de silicio en los que la corriente inversa (corriente de fuga) es pequeña, y entonces con sólo un poco más de voltaje de polarización inversa, se alcanza un voltaje de ruptura con base en el cual la corriente inversa aumenta con

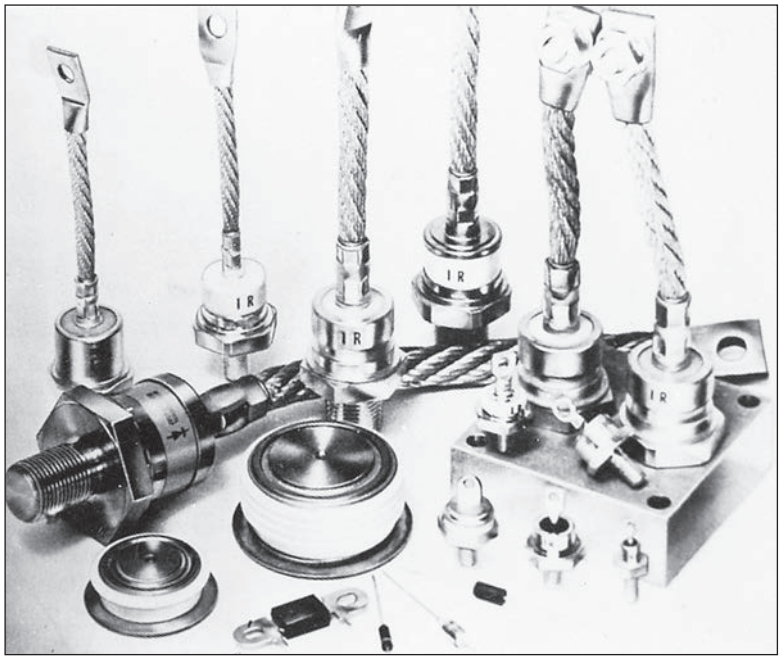


Figura 14.35
Fotografía de algunos rectificadores de diodo de silicio de baja a alta potencia.
(Cortesía de International Rectifier.)

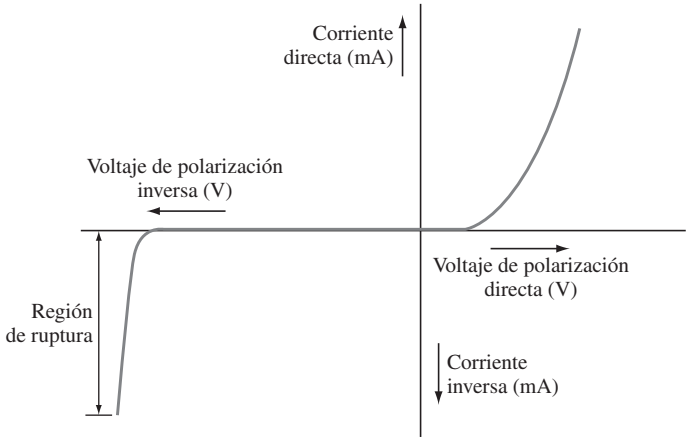


Figura 14.36
Curva característica del diodo zener (avalancha). Una gran corriente inversa se produce en la región del voltaje de ruptura.

mucha rapidez (figura 14.36). En la llamada ruptura zener, el campo eléctrico en el diodo se vuelve suficientemente intenso para atraer electrones directamente fuera de la retícula cristalina enlazada en forma covalente. Los pares electrón-hueco que se

crean producen después una alta corriente inversa. A voltajes de polarización inversa mayores que los voltajes de ruptura zener, ocurre el efecto de avalancha, y la corriente inversa es muy grande. Una teoría para explicar el efecto de avalancha es que los electrones ganan suficiente energía entre colisiones para golpear a más electrones de los enlaces covalentes, los cuales tienen la posibilidad entonces de alcanzar energías suficientemente altas para conducir electricidad. Los diodos de ruptura pueden hacerse con voltajes de ruptura desde unos cuantos voltios hasta varios cientos y se utilizan en aplicaciones de limitación de voltaje y en estabilización de este mismo bajo condiciones de corrientes ampliamente variables.

14.5.3 El transistor de unión bipolar

Un **transistor de unión bipolar** (BJT, por sus siglas en inglés) es un dispositivo electrónico que puede servir como un amplificador de corriente. Este dispositivo consta de dos uniones pn que se forman de manera secuencial en un solo cristal de un material semiconductor como el silicio. En la figura 14.37 se muestra de manera esquemática un transistor de unión bipolar tipo npn y se identifican las tres partes principales del transistor: *emisor, base* y *colector*. El emisor del transistor emite portadores de carga. Puesto que el emisor del transistor npn es de tipo n, emite electrones. La base del transistor controla el flujo de portadores de carga y es de tipo p para el transistor npn. La base se hace muy delgada (alrededor de 10^{-3} de espesor) y está ligeramente impurificada, de modo que sólo una pequeña fracción de los portadores de carga del emisor se recombinarán con los portadores mayoritarios de la base cargados de modo opuesto. El colector del BJT colecta portadores de carga, sobre todo del emisor. Puesto que la sección de colector del transistor npn es de tipo n, ésta colecta principalmente electrones del emisor.

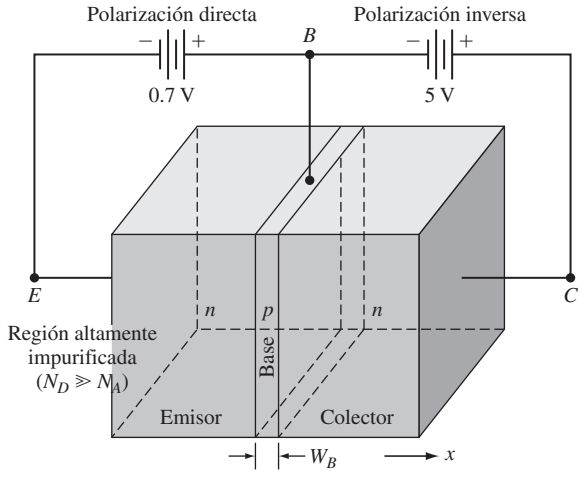


Figura 14.37
Ilustración esquemática de un transistor de unión bipolar npn. La región n a la izquierda es el emisor, la delgada región p a la mitad es la base, y la región n a la derecha es el colector. En la operación normal la unión emisor-base se polariza directamente y la unión colector-base inversamente.
(Tomado de C. A. Holt, "Electronic Circuits", Wiley, 1978, p. 49.)

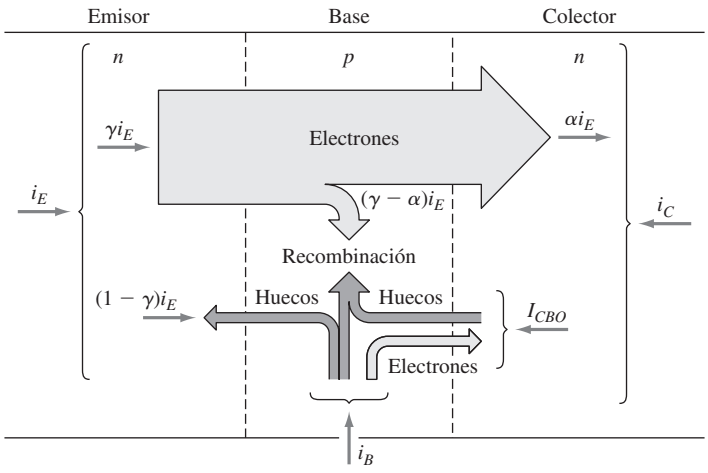


Figura 14.38
Movimiento de portadores de carga durante la operación normal de un transistor npn. La mayor parte de la corriente está compuesta por electrones del emisor que van directamente a través de la base hasta el colector. Algunos de los electrones, alrededor de 1 a 5 por ciento, se recombinan con huecos del flujo de corriente de la base. También están presentes pequeñas corrientes inversas que se deben a los portadores generados térmicamente, como se indica.
(Tomado de R. J. Smith, "Currents, Devices and Systems", 3a. ed., Wiley, 1976, p. 343.)

Bajo operación normal del transistor npn, la unión emisor-base está polarizada directamente, y la unión colector-base inversamente (figura 14.37). La polarización directa de la unión-base provoca una inyección de electrones desde el emisor hacia la base (figura 14.38). Algunos de los electrones inyectados en la base se pierden por recombinación con huecos en la base tipo p. Sin embargo, la mayor parte de los electrones del emisor pasan directamente a través de la delgada base hacia el colector, donde los atrae la terminal positiva del mismo. La impurificación considerable de emisores con electrones, la impurificación débil de la base con huecos y la base muy delgada son los factores que provocan que la mayor parte de los electrones del emisor (entre 95 a 99 por ciento) pasen directo a través del colector. Muy pocos huecos fluyen desde la base hasta el emisor. Casi todo el flujo de corriente de la terminal de la base a la región de la base es el flujo de huecos para sustituir aquellos que se pierden por la recombinación con electrones. El flujo de corriente a la base es pequeño y es casi de 1 a 5 por ciento de la corriente de electrones del emisor al colector. En muchos aspectos el flujo de corriente a la base puede considerarse como una válvula de control, pues es posible utilizar la pequeña corriente de la base para controlar la corriente del colector mucho más grande. El transistor bipolar se denomina de esa manera porque ambos tipos de portadores de carga (electrones y huecos) están implicados en su operación.

14.6 MICROELECTRÓNICA

La moderna tecnología de semiconductores ha hecho posible poner miles de transistores en un "chip" de silicio de aproximadamente 5 mm cuadrados de área y 0.2 mm de espesor. Esta capacidad de incorporar gran número de elementos electrónicos en

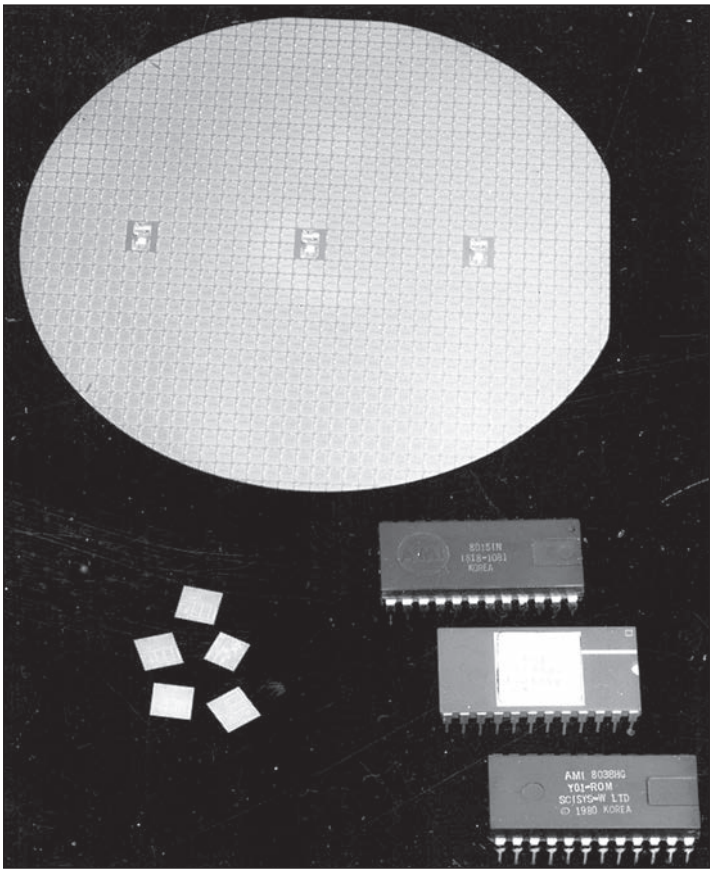


Figura 14.39
Esta fotografía muestra una oblea, circuitos integrados individuales y tres paquetes de chips (el paquete de en medio es cerámico y los otros dos son plásticos). Los tres dispositivos más grandes en la parte media de esta oblea son *monitores de control de procesos* (PCM, por sus siglas en inglés) para supervisar la calidad técnica de la matriz sobre la oblea.
[Cortesía de American Microsystems, Inc. (AMI), Santa Clara, Calif.]

chips de silicio ha incrementado de manera considerable la capacidad de los sistemas de dispositivos electrónicos (figura 14.1).

Los circuitos microelectrónicos *integrados a gran escala* (LSI, por sus siglas en inglés) se fabrican empezando con una oblea de un monocristal de silicio (tipo n o p) de alrededor de 100 a 125 mm de diámetro y 0.2 mm de espesor. La superficie de la oblea debe pulirse bastante y no tener defectos en un lado puesto que los dispositivos semiconductores se fabrican en la superficie pulida de la oblea. En la figura 14.39 se muestra una oblea de silicio después de que los circuitos microelectrónicos se han fabricado en su superficie. Casi de 100 a 1 000 chips (dependiendo de su tamaño) pueden producirse en una oblea.

Primero se examinará la estructura de un transistor bipolar de tipo plano fabricado en una superficie de oblea de silicio. Después se revisará de manera breve la

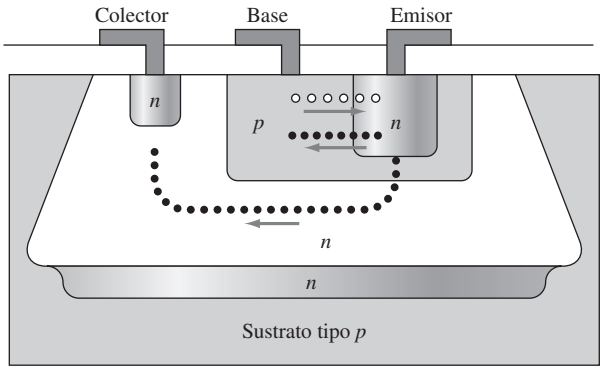


Figura 14.40
Transistor npn bipolar plano microelectrónico fabricado en un monocristal de silicio mediante una serie de operaciones que requieren acceso únicamente a una superficie del chip de silicio. El chip completo se impurifica con impurezas tipo p, y luego se forman las islas de silicio tipo n. Las áreas más pequeñas tipo p y tipo n se crean después dentro de estas islas para definir los tres elementos fundamentales del transistor: el emisor, la base y el colector. En este transistor bipolar microelectrónico, la unión emisor-base está polarizada directamente y la unión colector-base inversamente, como en el caso del transistor npn aislado de la figura 14.37. El dispositivo exhibe ganancia debido a que una pequeña señal aplicada a la base puede controlar a una grande en el colector.
(Tomado de J. D. Meindl, Microelectronic Circuit Elements, Sci. Am., septiembre 1977, p. 75. Copyright © Scientific American Inc., Derechos reservados.)

estructura de un tipo de transistor más compacto llamado el MOSFET, o *m*etal *o*xide *s*emiconductor *f*ield-*e*ffect *t*ransistor (transistor de efecto de campo de semiconductor de óxido metálico), el cual se usa en muchos sistemas de dispositivos semiconductores modernos. Por último, se describirán algunos de los procedimientos básicos que se emplean en la fabricación de circuitos microelectrónicos modernos.

14.6.1 Transistores bipolares planos microelectrónicos

Los transistores bipolares planos microelectrónicos se fabrican en la superficie de una oblea de un monocristal de silicio mediante una serie de operaciones que requieren acceso a sólo una superficie de la oblea de silicio. En la figura 14.40 se muestra un diagrama esquemático de la sección transversal de un transistor bipolar plano npn. En su fabricación, una isla relativamente grande de silicio tipo n se forma primero en una base de sustrato de silicio tipo p. Después se crean islas más pequeñas de silicio tipo p y tipo n en la isla más grande tipo n (figura 14.40). De este modo, las tres partes fundamentales del transistor bipolar npn, el emisor, la base y el colector, se forman en una configuración plana. Como en el caso del transistor bipolar npn individual descrito en la sección 14.5 (véase la figura 14.37), la unión emisor-base se polariza directamente y la unión base-colector inversamente. Así, cuando los electrones del emisor se inyectan en la base, la mayoría de ellos van al colector y sólo un pequeño porcentaje ($\sim$ 1 a 5 por ciento) se recombina con los huecos de la terminal de la base (véase la figura 14.38). El transistor bipolar plano

microelectrónico puede entonces funcionar como un amplificador de corriente en la misma forma que el transistor bipolar microelectrónico individual.

14.6.2 Transistores de efecto de campo planos microelectrónicos

En muchos de los sistemas microelectrónicos modernos de hoy día, otro tipo de transistor, llamado *transistor de efecto de campo*, se usa debido a su bajo costo y a su calidad de compacto. El transistor de efecto de campo más común utilizado en Estados Unidos es el transistor de efecto de campo semiconductor de óxido metálico tipo n. En el MOSFET tipo n, o NMOS, se crean dos islas de silicio tipo n en un sustrato de silicio tipo p, como se muestra en la figura 14.41. En el dispositivo NMOS el contacto donde los electrones entran se conoce como la *fuente*, y el contacto donde salen recibe el nombre de *drenaje*. Entre el silicio tipo n de la fuente y el drena-

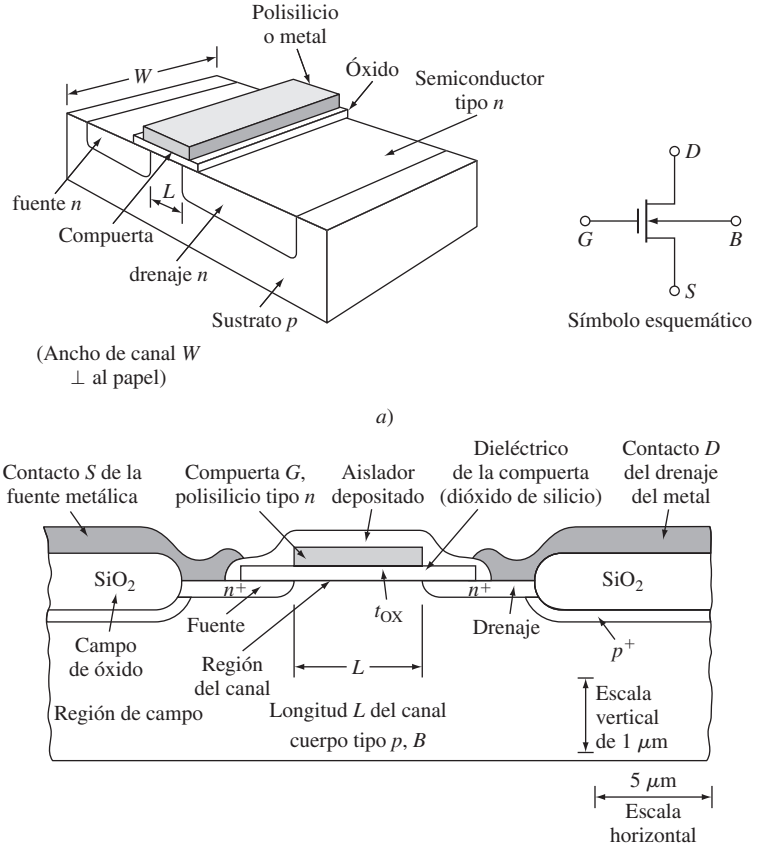


Figura 14.41
Diagrama esquemático de un transistor de efecto de campo NMOS: *a*) estructura completa y *b*) vista de la sección transversal.
(Tomado de D. A. Hodges y H. G. Jackson, "Analysis and Design of Digital Integrated Circuits", McGraw-Hill, 1983, p. 40.)

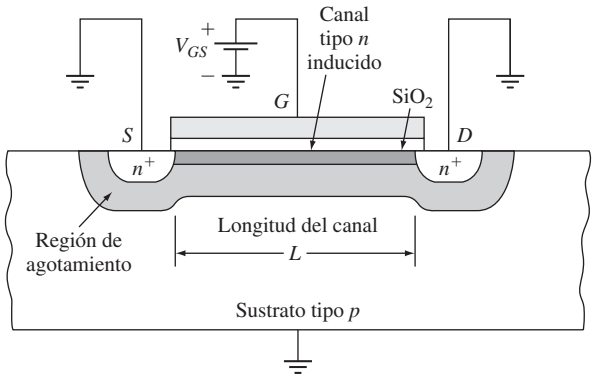


Figura 14.42
Sección transversal del dispositivo NMOS idealizado con voltaje de compuerta-fuente positivo (V_{GS}) aplicado, donde se muestran las regiones de agotamiento y el canal inducido.
(Tomado de D. A. Hodges y H. G. Jackson, "Analysis and Design of Digital Integrated Circuits", McGraw-Hill, 1983, p. 43.)

je, hay una región tipo p sobre cuya superficie se forma una delgada capa de dióxido de silicio que actúa como un aislante. En la parte superior del óxido de silicio otra capa de polisilicio (o metal) se deposita para formar el tercer contacto del transistor, denominado la *compuerta*. Puesto que el dióxido de silicio es un excelente aislador, la conexión de la compuerta no está en contacto eléctrico directo con el material tipo p debajo del óxido.

Para un tipo simplificado de NMOS cuando no se aplica voltaje a la compuerta, el material tipo p bajo esta misma contiene portadores mayoritarios que son huecos, y sólo unos cuantos electrones son atraídos hacia el drenaje. Sin embargo, cuando se aplica un voltaje positivo a la compuerta, su campo eléctrico atrae electrones de las regiones de la fuente y del drenaje n^+ cercanas a la delgada capa debajo de la superficie del dióxido de silicio, justo bajo la compuerta, de manera que esta región se convierte en silicio tipo n, con electrones que son los portadores mayoritarios (figura 14.42). Cuando los electrones están presentes en este canal, existe una trayectoria de conducción entre la fuente y el drenaje. De este modo, los electrones fluirán entre la fuente y el drenaje si hay una diferencia de voltaje positiva entre ellos.

El MOSFET, al igual que el transistor bipolar, es capaz también de amplificar corriente. La ganancia en dispositivos MOSFET suele medirse en términos de un cociente de voltaje en vez de un cociente de corriente como en el transistor bipolar. Los MOSFET tipo p con huecos para los portadores mayoritarios pueden fabricarse de manera similar, utilizando islas tipo p para la fuente y el drenaje en un sustrato tipo n. Puesto que los portadores de corriente son electrones en los dispositivos NMOS y huecos en los PMOS, éstos se conocen como *dispositivos de portadores mayoritarios*.

La tecnología MOSFET es la base para la mayor parte de los circuitos de memoria digitales integrados a gran escala, sobre todo porque el MOSFET individual requiere menor área del chip de silicio que el transistor bipolar y, en consecuencia, es posible obtener mayores densidades de transistores. Además, el costo de fabricación de los

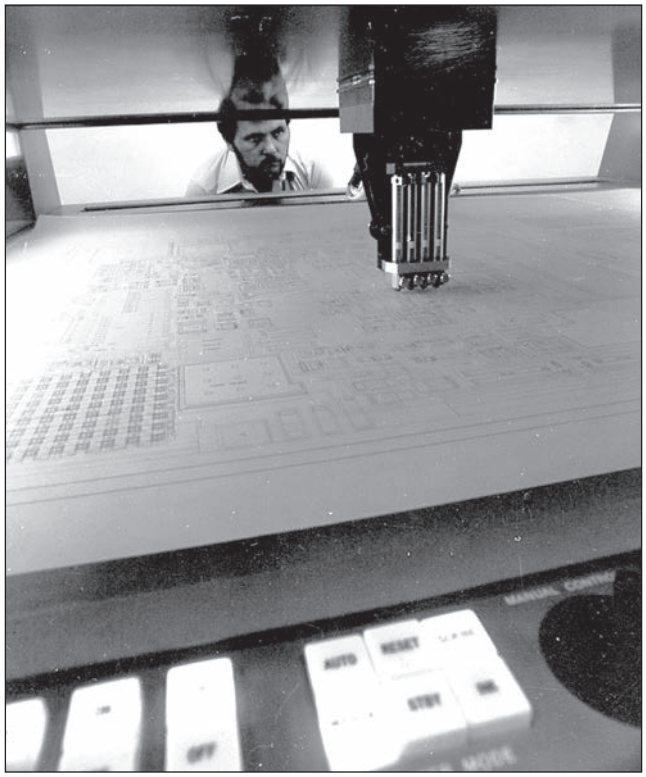


Figura 14.43
Distribución de ingeniería de una red de circuito integrado.
(Cortesía de Harris Corporation.)

MOSFET LSI es menor que el de los tipos de transistores bipolares. Sin embargo, hay algunas aplicaciones en las que son necesarios los transistores bipolares.

14.6.3 Fabricación de circuitos integrados microelectrónicos

El diseño de un circuito integrado microelectrónico se plasma primero a gran escala, casi siempre con asistencia de computadora, de manera que pueda lograrse el diseño que ahorre más espacio (figura 14.43). En el proceso de fabricación más común la disposición se usa para preparar un conjunto de fotomáscaras, en cada una de las cuales hay un patrón para una capa de circuito integrado terminado de capas múltiples (figura 14.44).

Fotolitografía El proceso mediante el cual un patrón microscópico se transfiere desde una fotomáscara hasta la superficie de la oblea de silicio del circuito integrado, se conoce como *fotolitografía*. En la figura 14.45 se muestran los pasos necesarios para formar una capa de dióxido de silicio aislante sobre la superficie de silicio, la cual contiene un patrón de regiones de sustrato de silicio expuesto. En un tipo de proce-

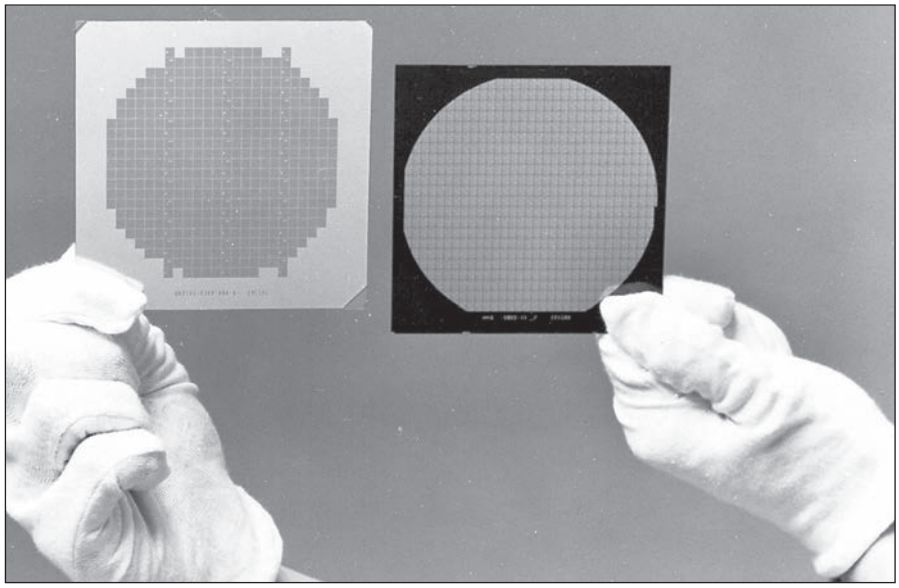


Figura 14.44
Esta fotografía describe dos tipos de máscaras fotolitográficas utilizadas en la fabricación de circuitos integrados. A la izquierda está la máscara de cromo más durable, la cual se usa para largas corridas de producción y puede emplearse para producir máscaras de emulsión como la que se muestra a la derecha. Las máscaras de emulsión son menos costosas y tienden a utilizarse en corridas de producción más cortas, tales como la fabricación de prototipos.
[Cortesía de American Microsystems, Inc. (AMI), Santa Clara, Calif.)

so fotolitográfico que se muestra en el paso 2 de la figura 14.45, una oblea oxidada se recubre primero con una capa de *fotoresist*, un material polimérico sensible a la luz. La propiedad importante del fotoresist es que su solubilidad en ciertos disolventes se ve muy afectada por su exposición a radiación *ultravioleta* (UV). Después de la radiación UV (paso 3 de la figura 14.45) y del desarrollo subsiguiente, queda un patrón de fotoresist en todas las zonas donde la máscara fue transparente a la radiación UV (paso 4 de la figura 14.45). La oblea de silicio se sumerge después en una solución de ácido fluorhídrico, la cual ataca únicamente al dióxido de silicio expuesto y no al fotoresist (paso 5 de la figura 14.45). En el paso final del proceso el patrón de fotoresist se elimina por medio de otro tratamiento químico (paso 6 de la figura 14.45). El proceso fotolitográfico ha mejorado al grado de que ahora es posible reproducir dimensiones de superficie hasta casi 0.5 μm.

Difusión e implantación de iones de impurezas en la superficie de obleas de silicio Para formar elementos de circuito activo como los transistores bipolar y MOS en circuitos integrados, es necesario introducir impurezas (donantes) de manera selectiva en el sustrato de silicio para crear regiones localizadas tipo n y tipo p. Hay dos técnicas principales para introducir impurificaciones en las obleas de silicio: 1) *difusión* y 2) *implantación de iones*.

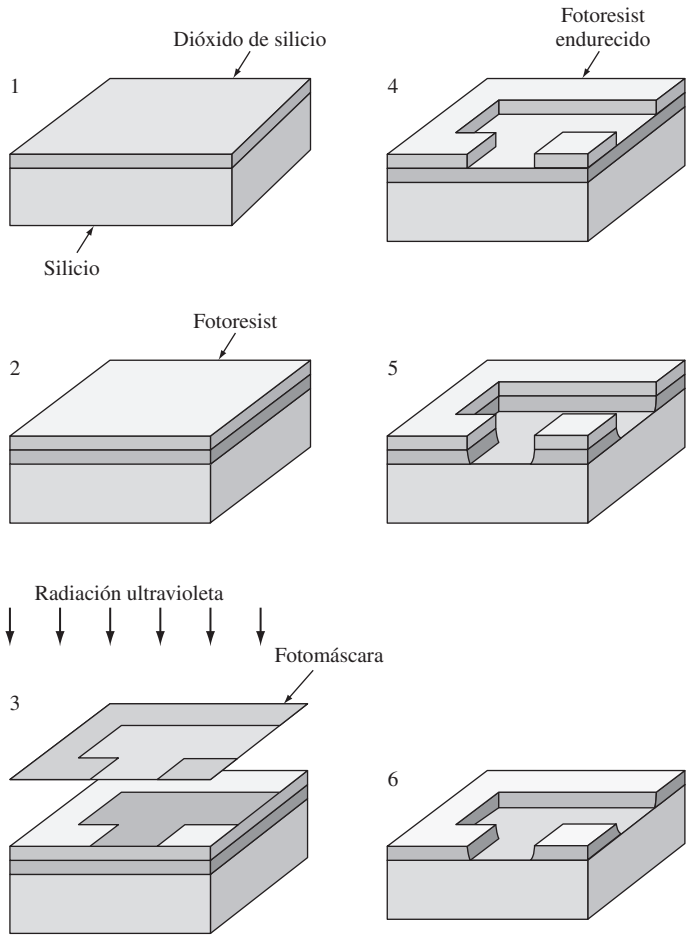


Figura 14.45
Los pasos del proceso fotolitográfico. En este proceso un patrón microscópico puede transferirse de una fotomáscara a una capa de material en un circuito real. En esta ilustración se muestra un patrón que se está grabando en una capa de dióxido de silicio sobre la superficie de la oblea de silicio. La oblea oxidada 1) se recubre primero con una capa de un material sensible a la luz llamado *fotoresist* 2) y después se expone a luz ultravioleta a través de la fotomáscara 3). La exposición produce la fotomáscara insoluble en una solución de revelador; en consecuencia, se deja un patrón de fotoresist en todos los puntos en que la máscara es transparente 4). La oblea se sumerge después en una solución de ácido fluorhídrico, la cual ataca de manera selectiva al dióxido de silicio, sin afectar al patrón de fotoresist y al sustrato de silicio 5). En el paso final el patrón de fotoresist se remueve mediante otro tratamiento químico 6).

(Tomado de W. G. Oldham, The Fabrication of Microelectronic Circuits, Sci. Am., septiembre de 1977, p. 121. Copyright © Scientific American Inc., Derechos reservados.)

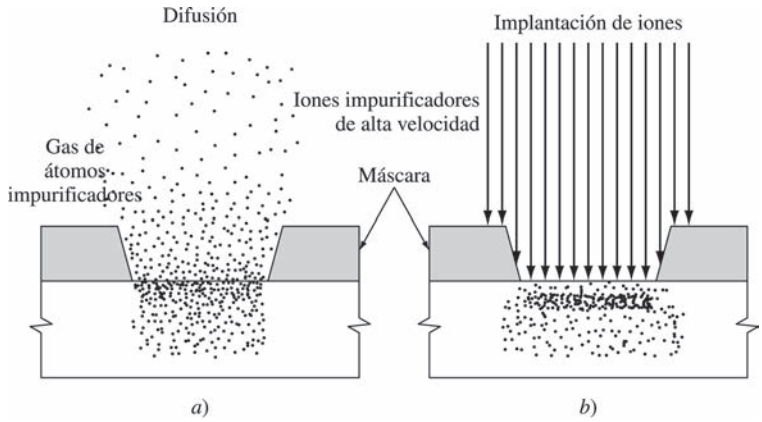


Figura 14.46
Proceso de impurificación selectivo en superficies de silicio expuestas: *a*) difusión de alta temperatura de átomos de impurezas; y *b*) implantación de iones.
(Tomado de S. Triebwasser "Today and Tomorrow in Microelectronics", de los Proceedings de un taller de la NSF realizado en Arlie, Va., nov. 19-22, 1978.)

La técnica de difusión Como se describió antes en la sección 5.3, los átomos de impurezas se difunden en las obleas de silicio a altas temperaturas, esto es, alrededor de 1 000 a 1 100°C. Átomos impurificadores importantes como el boro y el fósforo se mueven con mucha mayor lentitud a través del dióxido de silicio que a través de la red cristalina de silicio. Patrones de dióxido de silicio delgados pueden servir como máscaras para evitar que los átomos impurificadores penetren dentro del silicio (figura 14.46*a*). Así, un enrejado de obleas de silicio puede colocarse en un horno de difusión a 1 000-1 100°C en una atmósfera que contiene fósforo (o boro), por ejemplo. Los átomos de fósforo entrarán en la superficie no protegida del silicio y se difundirán de manera lenta dentro de la masa de la oblea, como se muestra en la figura 14.46*a*.

Las variables importantes que controlan la concentración y profundidad de penetración son la *temperatura* y el *tiempo*. Para alcanzar el máximo control de concentración, la mayoría de las operaciones de difusión se efectúan en dos pasos; en el primero, o paso de *predepósito*, se deposita cerca de la superficie de la oblea una concentración relativamente alta de átomos impurificadores. Luego del paso de predepósito, las obleas se ponen en otro horno, casi siempre a una temperatura más alta, para el paso de *difusión de entrada*, que alcanza la concentración necesaria de átomos impurificadores a una profundidad particular debajo de la superficie de la oblea de silicio.

La técnica de implantación de iones Otro proceso de impurificación selectivo para obleas de silicio de circuitos integrados, es la técnica de implantación de iones (figura 14.46*b*) que tiene la ventaja de que las impurezas donantes pueden incrustarse a temperatura ambiente. En este proceso los átomos impurificadores se ionizan (los electrones se remueven de los átomos para formar iones) y los iones se aceleran hasta altas energías a través de una diferencia de potencial elevada de 50 a 100 kV. Cuando los iones inciden sobre la oblea de silicio, se incrustan hasta profundidades variables, dependiendo de su masa y energía y del tipo de protección superficial de la

superficie de silicio. Un patrón de fotoresist o de dióxido de silicio puede enmascarar regiones de la superficie donde no se desea la implantación de iones. Los iones acelerados provocan cierto daño en la red cristalina de silicio, pero gran parte del mismo puede regenerarse mediante recocido a una temperatura moderada. La implantación de iones es útil dondequiera que el nivel de impurificación deba controlarse con exactitud. Otra ventaja importante de la implantación de iones es la capacidad para introducir impurezas dopantes a través de una delgada capa de óxido. Esta técnica posibilita ajustar los voltajes de umbral de los transistores MOS. Mediante la implantación de iones, tanto los transistores NMOS como los PMOS pueden fabricarse sobre la misma oblea.

Tecnología de fabricación de circuitos integrados MOS Hay muchos procedimientos diferentes que se utilizan en la fabricación de circuitos integrados MOS. Continuamente se logran nuevas innovaciones y descubrimientos para mejorar el diseño de equipos y el procesamiento de CI en esta tecnología que avanza con rapidez. La secuencia de procesamiento general para un método de producción de circuitos integrados NMOS se describe en los siguientes pasos[4] y se ilustra en las figuras 14.47 y 14.48.

1. (Véase la figura 14.47*a*.) Con un proceso de *depósito químico en fase vapor* (DQV) se deposita una delgada capa de nitruro de silicio (Si_3N_4) sobre la superficie completa de la oblea. El primer paso fotolitográfico define áreas donde se van a formar los transistores. El nitruro de silicio se remueve de las áreas del transistor mediante grabado químico. Se implantan iones de boro (tipo p) en las regiones expuestas para suprimir la conducción que no se desea entre los sitios del transistor. Después, una capa de dióxido de silicio (SiO_2) de casi 1 μm de espesor se crece térmicamente en estas regiones, o campo, inactivas, exponiendo la oblea al oxígeno en un horno eléctrico. Esto se conoce como proceso de oxidación *selectiva* o *local*. El (Si_3N_4) es impermeable al oxígeno y por ello inhibe el crecimiento del óxido grueso en las regiones del transistor.
2. (Véase la figura 14.47*b.*) El Si_3N_4 se remueve después mediante un grabador químico que no ataca al SiO_2. Un óxido térmico limpio de casi 0.1 μm de espesor se crece en las áreas del transistor, de nuevo mediante la exposición al oxígeno en un horno. Otro proceso de DQV deposita una capa de silicio policristalino (poli) sobre la oblea completa. El segundo paso fotolitográfico define los patrones deseados para los electrodos de compuerta. El poli indeseado se remueve mediante grabado químico o de plasma (gas reactivo). Un impurificador tipo n (fósforo o arsénico) se introduce en las regiones que se convertirán en la fuente y el drenaje del transistor. Es posible utilizar ya sea difusión térmica o implantación de iones, en este proceso de impurificación. El óxido de campo grueso y la compuerta poli son barreras para las impurezas, aunque en el proceso, el poli se vuelve tipo n fuertemente impurificado.
3. (Véase la figura 14.47*c.*) Otro proceso de DQV deposita una capa de aislante, a menudo SiO_2, sobre la oblea completa. El tercer paso de enmascaramiento define las áreas en las cuales es necesario hacer contacto con los transistores, como se muestra en la figura 14.47*c*. El grabado químico o de plasma expone de manera selectiva el silicio o poli sin recubrir en las áreas de contacto.

---

[4] Tomado de D. A. Hodges y H. G. Jackson, *Analysis and Design of Digital Integrated Circuits,* McGraw-Hill, 1983, pp. 16-18.

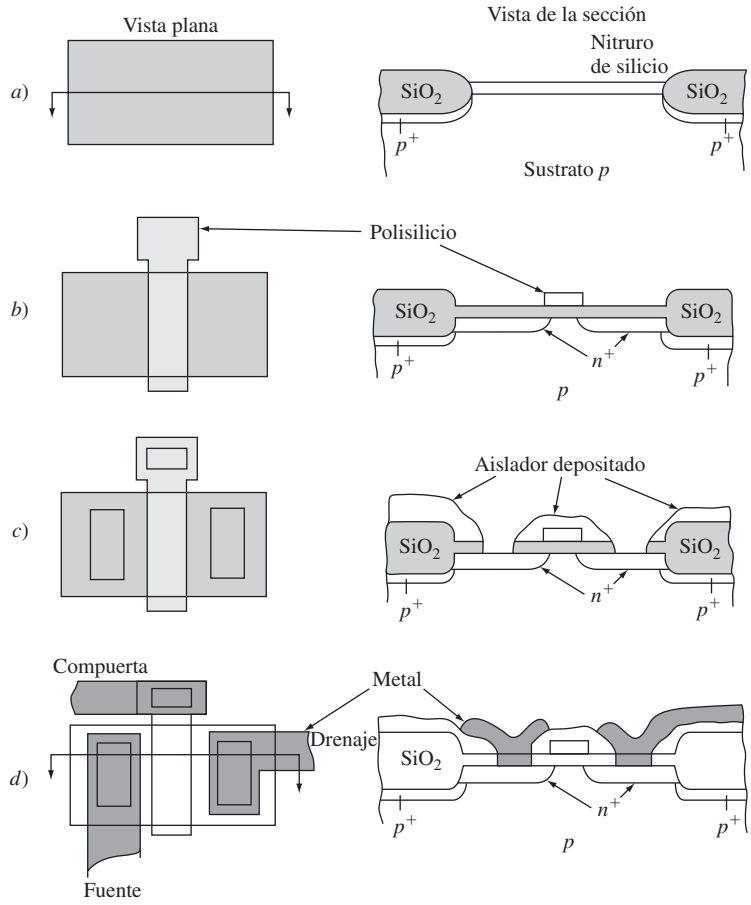


Figura 14.47
Pasos en la fabricación del transistor de efecto de campo NMOS: *a*) primera máscara; *b*) segunda máscara: compuesta de polisilicio y difusión de la fuente-drenaje; *c*) tercera máscara: áreas de contacto; y *d*) cuarta máscara: patrón del metal.
(Tomado de D. A. Hodges y H. G. Jackson, "Analysis and Design of Digital Integrated Circuits", McGraw-Hill, 1983, p. 17.)

4. El aluminio (Al) se deposita sobre la oblea completa mediante evaporación a partir de un crisol caliente en un evaporador al vacío. El cuarto paso de enmascaramiento modela al Al según se desea para las conexiones del circuito, como se ilustra en la figura 14.47*d*.

5. Una capa pasivadora protectora se deposita sobre la superficie completa. Un paso de enmascaramiento final remueve esta capa aislante sobre las almohadillas donde se hará contacto. Los circuitos se prueban utilizando sondas similares a agujas sobre las almohadillas de contacto. Se marcan las unidades defectuosas, y la oblea se corta con sierra para formar los chips individuales. Los chips buenos se empaquetan y se envían a una prueba final.

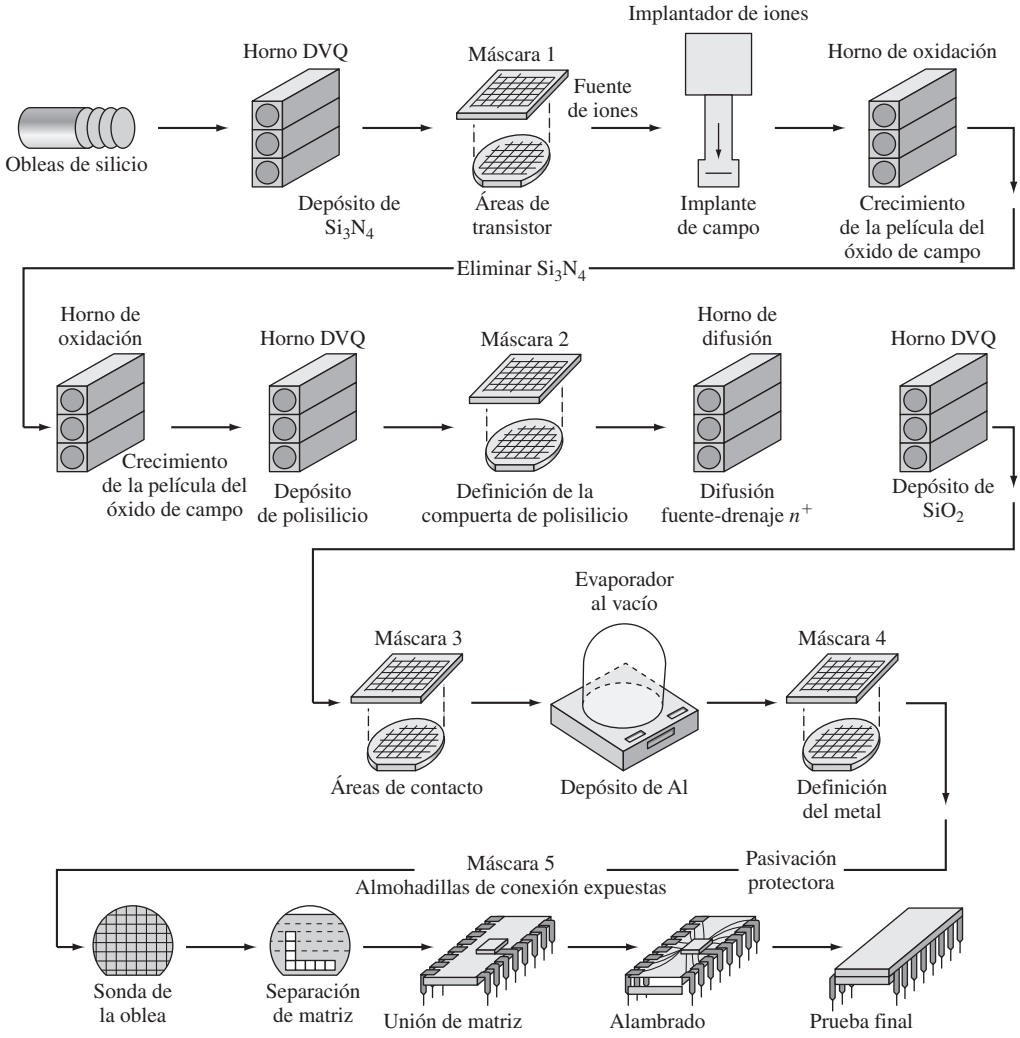


Figura 14.48
Proceso de manufactura para circuitos integrados de compuerta de silicio NMOS. (El proceso utilizado para fabricar circuitos integrados NMOS varía considerablemente de una compañía a otra. Esta secuencia se da como una descripción.)
(Cortesía de Integrated Circuit Engineering Co.)

Éste es el proceso más simple para formar circuitos NMOS; se resume esquemáticamente en la figura 14.48. Procesos de circuitos NMOS más avanzados requieren más pasos de enmascaramiento.

Dispositivos de semiconductor de óxido metálico complementario (**CMOS**, por sus siglas en inglés) Es posible fabricar un chip que contenga ambos tipos de MOSFET (NMOS y PMOS), aunque sólo aumentando la complejidad del circuito y reduciendo la densidad de los transistores. Los circuitos que contienen dispositivos tanto NMOS

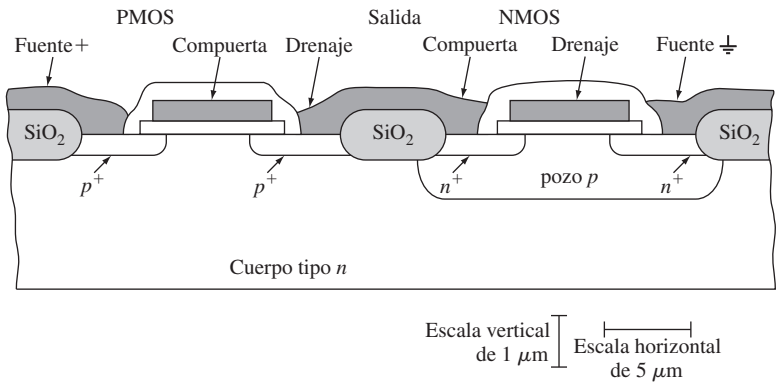


Figura 14.49
Transistores de efecto de campo MOS complementarios (CMOS). Los transistores tanto tipo n como tipo p se fabrican sobre el mismo sustrato de silicio.
(Tomado de D. A. Hodges y H. G. Jackson, "Analysis and Design of Digital Integrated Circuits", McGraw-Hill, 1983, p. 42.)

como PMOS se denominan *circuitos complementarios* o *CMOS*, y pueden formarse, por ejemplo, aislando todos los dispositivos NMOS con islas de material tipo p (figura 14.49). Una ventaja de los circuitos CMOS es que los dispositivos MOS pueden arreglarse para lograr un menor consumo de potencia. Los dispositivos CMOS se utilizan en una diversidad de aplicaciones. Por ejemplo, los circuitos CMOS integrados a gran escala se usan en casi todos los relojes y calculadoras electrónicos modernos. Además, la tecnología CMOS se está volviendo de mayor importancia en el uso de microprocesadores y memorias de computadora.

14.7 SEMICONDUCTORES COMPUESTOS

Hay muchos compuestos de elementos diferentes que son semiconductores. Entre los principales tipos de compuestos semiconductores están los MX, donde M es un elemento más electropositivo y X es un elemento más electronegativo. De los compuestos semiconductores MX, dos grupos importantes son los compuestos III-V y II-VI formados por elementos adyacentes al grupo IV-A de la tabla periódica (figura 14.50). Los compuestos semiconductores III-V consisten en elementos M del grupo III tales como Al, Ga e In combinados con elementos X del grupo V como P, As y Sb. Los compuestos II-VI constan de elementos M del grupo II tales como Zn, Cd y Hg combinados con elementos X del grupo VI como S, Se y Te.

En la tabla 14.6 se enlista algunas de las propiedades eléctricas de semiconductores compuestos seleccionados. De acuerdo con esta tabla es posible observar las siguientes tendencias.

1. Cuando la masa molecular de un compuesto dentro de una familia aumenta descendiendo en las columnas de la tabla periódica, disminuye la brecha de la banda de energía, aumenta la movilidad de los electrones (son excepciones el GaAs y el GaSb), y aumenta la constante de red. Los electrones de los átomos más grandes y

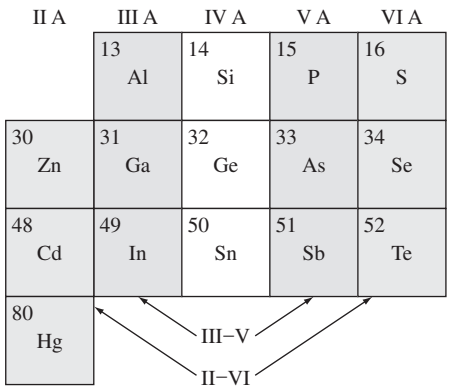


Figura 14.50
Parte de la tabla periódica que contiene los elementos utilizados en la formación de compuestos de semiconductor III-V y II-VI de tipo MX.

Tabla 14.6 Propiedades eléctricas de compuestos semiconductores intrínsecos a temperatura ambiente (300 K)

Grupo	Material	E_g eV	μ_n $m^2/(V \cdot s)$	μ_p $m^2/(V \cdot s)$	Constante de red	n_i portadores/m^3
IV A	Si	1.10	0.135	0.048	5.4307	1.50×10^{16}
	Ge	0.67	0.390	0.190	5.257	2.4×10^{19}
III A–V A	GaP	2.25	0.030	0.015	5.450	
	GaAs	1.47	0.720	0.020	5.653	1.4×10^{12}
	GaSb	0.68	0.500	0.100	6.096	
	InP	1.27	0.460	0.010	5.869	
	InAs	0.36	3.300	0.045	6.058	
	InSb	0.17	8.000	0.045	6.479	1.35×10^{22}
II A–VI A	ZnSe	2.67	0.053	0.002	5.669	
	ZnTe	2.26	0.053	0.090	6.104	
	CdSe	2.59	0.034	0.002	5.820	
	CdTe	1.50	0.070	0.007	6.481	

Fuente: W. R. Runyun y S. B. Watelski, en C. A. Harper (ed.), *Handbook of Materials and Processes for Electronics*, McGraw-Hill, Nueva York, 1970.

pesados tienen, en general, más libertad de moverse y están ligados menos firmemente a sus núcleos y, por ello, tienden a tener brechas de banda más pequeñas y movilidades de electrones más altas.

2. Al moverse a través de la tabla periódica desde los elementos del grupo IV-A a los materiales III-V y II-VI, el carácter mayor del enlace iónico provoca que aumenten las brechas de la banda de energía y disminuyan las movilidades de los electrones. El mayor enlace iónico ocasiona un enlace más fuerte de los electrones a sus núcleos de iones positivos, y por eso los compuestos II-VI tienen brechas de banda más grandes que los compuestos III-V comparables.

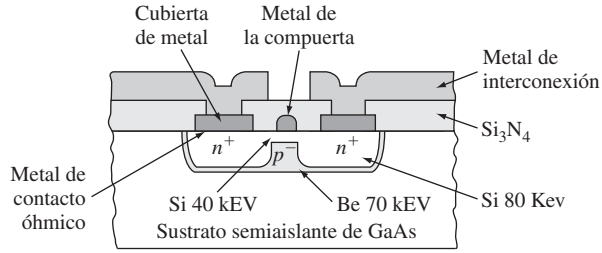


Figura 14.51
Vista de la sección transversal de un MESFET de GaAs.
[Tomado de A. N. Sato et al., IEEE Electron. Devices Lett., **9(5):***238 (1988).]*

El arseniuro de galio es el más importante de todos los compuestos semiconductores y se usa en muchos dispositivos electrónicos. El GaAs se ha utilizado por mucho tiempo para componentes discretos en circuitos de microondas. En la actualidad, muchos circuitos integrados digitales se fabrican con GaAs. Los *transistores de efecto de campo de semiconductor metálico* (MESFET) de GaAs son los que se usan más en los transistores de GaAs (figura 14.51).

Los MESFET de GaAs ofrecen algunas ventajas sobre el silicio como dispositivos utilizados en circuitos integrados digitales de alta velocidad. Algunas de éstas son:

1. Los electrones viajan más rápido en GaAs tipo n, como se indica por su mayor movilidad en GaAs, que en Si [$\mu_n = 0.720\ m^2/(V \cdot s)$ para GaAs en comparación con $0.135\ m^2/(V \cdot s)$ para Si].

2. Debido a su mayor brecha de banda de 1.47 eV y a la ausencia de un óxido de compuerta crítica, se dice que los dispositivos de GaAs tienen mejor resistencia a la radiación. Esta consideración es importante en aplicaciones espaciales y militares.

Desafortunadamente, la mayor limitación de la tecnología GaAs es que la producción de circuitería de CI complejos es mucho menor que la de silicio debido sobre todo al hecho de que el GaAs contiene más defectos en el material base que el silicio. El costo de producir el material base también es más alto para el GaAs que para el silicio. Sin embargo, el uso de GaAs se está expandiendo, y una fuerte investigación se está efectuando en esta área.

PROBLEMA DE EJEMPLO 14.10

a) Calcule la conductividad eléctrica intrínseca del GaAs a 1) temperatura ambiente (27°C) y 2) 0°C.

b) ¿Qué fracción de la corriente conducen los electrones en el GaAs intrínseco a 27°C?

■ Solución

a) 1) σ a 27°C:

$$\begin{aligned}\sigma &= n_i q(\mu_n + \mu_p)\\ &= (1.4 \times 10^{12}\ m^{-3})(1.60 \times 10^{-19}\ C)[0.720\ m^2/(V \cdot s) + 0.020\ m^2/(V \cdot s)]\\ &= 1.66 \times 10^{-7}\ (\Omega \cdot m)^{-1}\ \blacktriangleleft\end{aligned}$$

2) σ a 70°C:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g/2kT} \qquad \textbf{(14.16}\boldsymbol{a}\textbf{)}$$

$$\frac{\sigma_{343}}{\sigma_{300}} = \frac{\exp\{-1.47\ \text{eV}/[(2)(8.62 \times 10^{-5}\ \text{eV/K})(343\ \text{K})]\}}{\exp\{-1.47\ \text{eV}/[(2)(8.62 \times 10^{-5}\ \text{eV/K})(300\ \text{K})]\}}$$

$$\sigma_{343} = \sigma_{300} e^{3.56} = 1.66 \times 10^{-7}\,(\Omega \cdot \text{m})^{-1}\,(35.2)$$

$$= 5.84 \times 10^{-6}\,(\Omega \cdot \text{m})^{-1} \blacktriangleleft$$

b) $$\frac{\sigma_n}{\sigma_n + \sigma_p} = \frac{n_i q \mu_n}{n_i q(\mu_n + \mu_p)} = \frac{0.720\ \text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})}{0.720\ \text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s}) + 0.020\ \text{m}^2(\text{V} \cdot \text{s})} = 0.973 \blacktriangleleft$$

14.8 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE CERÁMICAS

Los materiales cerámicos se utilizan en muchas aplicaciones eléctricas y electrónicas. Muchos tipos de cerámicas se emplean en aisladores eléctricos para corrientes eléctricas de alto y bajo voltaje. Los materiales cerámicos también tienen aplicaciones en diversos tipos de capacitores, en especial donde se requiere la miniaturización. Otros tipos de cerámicas denominados piezoeléctricos pueden convertir débiles señales de presión en señales eléctricas y viceversa.

Antes de discutir las propiedades eléctricas de diversos tipos de materiales cerámicos, se revisarán de manera breve algunas propiedades básicas de los aislantes o **dieléctricos**, como algunas veces se les llama.

14.8.1 Propiedades básicas de los dieléctricos

Hay tres propiedades importantes comunes de todos los aislantes o dieléctricos: 1) la *constante dieléctrica*, 2) la resistencia a la *ruptura dieléctrica* y 3) el factor de pérdida.

Constante dieléctrica Considérese un capacitor simple de placas paralelas[5] con placas metálicas de área A separadas por la distancia d, como se muestra en la figura 14.52. Supóngase primero el caso en que el espacio entre las placas es el vacío.

[5] Un **capacitor** es un dispositivo que almacena energía eléctrica.

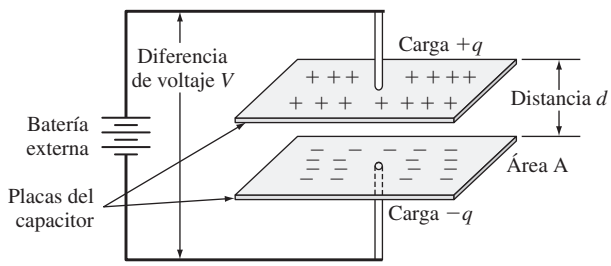


Figura 14.52
Capacitor de placas paralelas simple.

Se aplica un voltaje V entre las placas, una adquirirá una carga neta de $+q$ y la otra una carga de $-q$. Se encuentra que la carga q es directamente proporcional al voltaje aplicado V como

$$q = CV \qquad \text{o} \qquad C = \frac{q}{V} \tag{14.23}$$

donde C es una constante de proporcionalidad llamada la **capacitancia** del capacitor. La unidad del SI de capacitancia es culombios por voltios (C/V) o el *faradio* (F). De este modo,

$$1 \text{ faradio} = \frac{1 \text{ culombio}}{\text{voltio}}$$

Puesto que el faradio es una unidad mucho mayor de capacitancia que la que se encuentra por lo común en la circuitería eléctrica, las unidades que se usan de manera más general son el *picofaradio* ($1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$) y el *microfaradio* ($1 \ \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$).

La capacitancia de un capacitor es una medida de su capacidad para almacenar carga eléctrica. Cuanto mayor es la carga almacenada en las placas superior e inferior del capacitor, tanto más alta es la capacitancia.

La capacitancia C de un capacitor de placas paralelas cuyas dimensiones de área son mucho mayores que la distancia de separación de las placas, está dada por

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \tag{14.24}$$

donde ϵ_0 = permisividad del espacio libre = 8.854×10^{-12} F/m.

Cuando un dieléctrico (aislador eléctrico) llena el espacio entre las placas (figura 14.53), la capacitancia del capacitor se incrementa por un factor κ, que recibe el nombre de **constante dieléctrica** del material dieléctrico. En un capacitor de placas paralelas con un dieléctrico entre las placas del mismo,

$$C = \frac{\kappa \epsilon_0 A}{d} \tag{14.25}$$

En la tabla 14.7 se presentan las constantes dieléctricas de algunos materiales aislantes cerámicos.

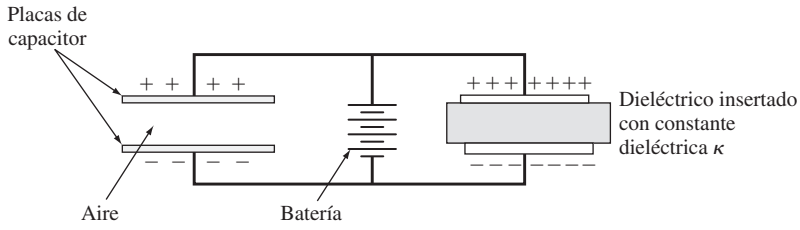


Figura 14.53
Capacitor de dos placas paralelas bajo el mismo voltaje aplicado. El capacitor a la derecha tiene un dieléctrico (aislador insertado entre las placas) y como resultado la carga en las placas se incrementa por un factor de κ por arriba del de las placas del capacitor sin el dieléctrico.

Tabla 14.7 Propiedades eléctricas de algunos materiales aislantes cerámicos

Material	Resistividad de volumen ($\Omega \cdot m$)	Resistencia dieléctrica		Constante dieléctrica κ		Factor de pérdida	
		V/mil	kV/mm	60 Hz	10^6 Hz	60 Hz	10^6 Hz
Aisladores de porcelana eléctrica	10^{11}-10^{13}	55-300	2-12	6	···	0.06	
Aisladores de esteatita	$>10^{12}$	145-280	6-11	6	6	0.008-0.090	0.007-0.025
Aisladores de fosterita	$>10^{12}$	250	9.8	···	6	···	0.001-0.002
Aisladores de alúmina	$>10^{12}$	250	9.8	···	9	···	0.0008-0.009
Vidrio de sosa-cal	···	···	···	···	7.2	···	0.009
Sílice fundida	···	8	···	···	3.8	···	0.00004

Fuente: Materiales Selector, *Mater. Eng.,* diciembre de 1982.

La energía que se almacena en un capacitor de un volumen dado a un voltaje determinado se incrementa por un factor de la constante dieléctrica cuando está presente el material dieléctrico. Al utilizar un material con una constante dieléctrica muy alta, es posible producir capacitores muy pequeños con capacitancias elevadas.

Resistencia dieléctrica Otra propiedad además de la constante dieléctrica que es importante al evaluar dieléctricos, es la **resistencia dieléctrica**. Esta cantidad es una medida de la capacidad del material para retener energía a altos voltajes. La resistencia dieléctrica se define como el voltaje por longitud unitaria (campo eléctrico o gradiente de voltaje) a la cual ocurre una falla y, en consecuencia, es el campo eléctrico máximo que el dieléctrico puede mantener sin ruptura eléctrica.

La resistencia dieléctrica se mide de modo más común en voltios por milésimo de pulgada o kilovoltios por milímetro. Si el dieléctrico se somete a un gradiente de voltaje que es demasiado intenso, la cadena de electrones o iones que está tratando de atravesar el dieléctrico quizá exceda su resistencia dieléctrica. Si se supera la resistencia dieléctrica, el material dieléctrico empieza a fallar y ocurre el paso de corriente (electrones). En la tabla 14.7 se enlistan las resistencias dieléctricas de algunos materiales aislantes cerámicos.

Factor de pérdida dieléctrica Si el voltaje que se utiliza para mantener la carga en un capacitor es senoidal, como el que genera una corriente eléctrica alterna, la corriente adelanta al voltaje por 90 grados cuando un dieléctrico sin pérdida está entre las placas de un capacitor. Sin embargo, cuando se emplea un dieléctrico real en el capacitor, la corriente adelanta al voltaje por $90° - \delta$, donde el ángulo δ recibe el nombre de *ángulo de pérdida dieléctrica*. El producto de κ y δ se denomina el *factor de pérdida* y es una medida de la energía eléctrica perdida (como energía térmica) por un capacitor en un circuito de CA. En la tabla 14.7 se presentan los factores de pérdida para algunos materiales aislantes cerámicos.

PROBLEMA DE EJEMPLO 14.11

Un capacitor de placas paralelas simple se va a construir para almacenar 5.0×10^{-6} a un potencial de 8 000 V. La distancia de separación entre las placas será de 0.30 mm. Calcule el área (en metros cuadrados) que las placas deben tener si el dieléctrico entre ellas es *a*) vacío ($\kappa = 1$) y *b*) alúmina ($\kappa = 9$). $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m.

■ **Solución**

$$C = \frac{q}{V} = \frac{5.0 \times 10^{-6}\,\text{C}}{8000\,\text{V}} = 6.25 \times 10^{-10}\,\text{F}$$

$$A = \frac{Cd}{\epsilon_0 \kappa} = \frac{(6.25 \times 10^{-10}\ \text{F})(0.30 \times 10^{-3}\ \text{m})}{(8.85 \times 10^{-12}\ \text{F/m})(\kappa)}$$

a) Para vacío, $\kappa = 1$: $A = 0.021\ \text{m}^2$
b) Para alúmina, $\kappa = 9$: $A = 2.35 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$

Como puede verse a partir de estos cálculos, la inserción de un material con una alta constante dieléctrica puede reducir de manera considerable el área requerida de las placas.

14.8.2 Materiales aisladores cerámicos

Los materiales cerámicos tienen propiedades eléctricas y mecánicas que los hacen especialmente adecuados en muchas aplicaciones de aislantes en las industrias eléctrica y electrónica. Los enlaces iónico y covalente en los materiales cerámicos restringen la movilidad de electrones y iones, y por ello hacen que estos materiales sean buenos aislantes eléctricos. Estos enlaces son la causa de que la mayoría de los materiales cerámicos sean resistentes aunque relativamente quebradizos. La composición química y la microestructura de las cerámicas de grado eléctrico o electrónico deben controlarse más que en el caso de las cerámicas estructurales tales como ladrillos o losetas. Ahora se discutirán algunos aspectos de la estructura y propiedades de varios materiales cerámicos aislantes.

Porcelana eléctrica Las porcelanas eléctricas comunes consisten aproximadamente en 50 por ciento de arcilla ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), 25 por ciento de sílice (SiO_2), y 25 por ciento de feldespato ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$). Esta composición hace que el material tenga una buena plasticidad antes de algún procesamiento y un amplio intervalo de temperatura de ignición a un costo más o menos bajo. La principal desventaja de un material aislante eléctrico es que tiene un alto factor de pérdida de potencia en comparación con otros materiales aislantes eléctricos (tabla 14.7), lo cual se debe a iones álcali altamente móviles. La figura 11.33 presenta la microestructura de un material de porcelana eléctrica.

Esteatita Las porcelanas de esteatita son buenos aislantes eléctricos porque tienen bajos factores de pérdida de potencia, baja absorción de humedad y buena resistencia al impacto, además de que se utilizan de manera amplia en las industrias de aparatos electrónicos y eléctricos. Las composiciones de la esteatita se basan en casi 90 por ciento de talco ($3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$) y 10 por ciento de arcilla. La microestructura de la esteatita cocida consiste en cristales de esteatita ($MgSiO_3$) ligados en conjunto por una matriz cristalina. En la figura 14.54 se muestran algunos ejemplos de partes de aislador de esteatita para aplicaciones eléctricas.

Fosterita La fosterita tiene la fórmula química Mg_2SiO_4 y por ello no contiene iones álcali en fase cristalina, por lo que cuenta con una mayor resistividad y menores pérdidas eléctricas con el aumento de la temperatura que los aisladores de esteatita. La fosterita también tiene propiedades dieléctricas de menor pérdida a altas frecuencias (tabla 14.7).

Alúmina Las cerámicas de alúmina tienen óxido de aluminio (Al_2O_3) como la fase cristalina ligada con una matriz vítrea. La fase vítrea, por lo común sin álcali, está compuesta por mezclas de arcilla, talco y fluidificantes alcalinotérreos y suele no con-

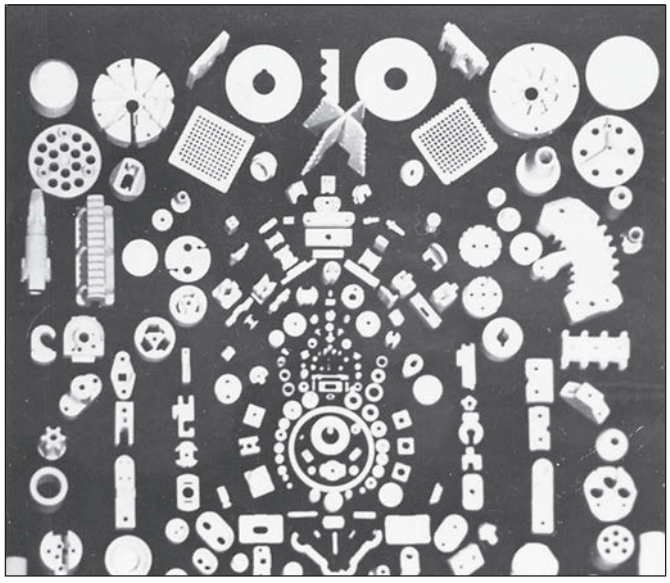


Figura 14.54
Algunas piezas de aisladores electrónicos y eléctricos de esteatita.
(Cortesía de Wisconsin Porcelain Co.)

tener álcali. Las cerámicas de alúmina presentan resistencias dieléctricas más o menos altas y bajas pérdidas dieléctricas junto con resistencias relativamente elevadas. La alúmina sinterizada (99 por ciento de Al_2O_3) se usa bastante como un sustrato en aplicaciones de dispositivos electrónicos (figura 11.1*b*) por sus bajas pérdidas dieléctricas y superficie lisa (figura 11.34). La alúmina también se utiliza en aplicaciones de pérdidas ultrabajas en las que es necesaria una gran transferencia de energía a través de la ventana cerámica como, por ejemplo, en la cúpula de la antena de radares.

14.8.3 Materiales cerámicos para capacitores

Los materiales cerámicos se emplean comúnmente como materiales dieléctricos en capacitores, donde los capacitores cerámicos de disco son por mucho el tipo más común de capacitor cerámico (figura 14.55). Estos capacitores cerámicos muy pequeños de disco plano, están compuestos principalmente por titanato de bario ($BaTiO_3$) juntos con otros aditivos (tabla 14.8). ($BaTiO_3$) se emplea debido a su muy alta constante dieléctrica de 1 200 a 1 500. Con aditivos, su constante dieléctrica puede elevarse a valores de muchos miles. En la figura 14.55*b* se presentan las etapas en la fabricación de un tipo de capacitor cerámico de disco. En este tipo de capacitor una capa de plata sobre la parte superior y la inferior del disco proporciona las "placas" metálicas del capacitor. Para lograr capacitancias muy altas con dispositivos de tamaño mínimo, se han desarrollado pequeños capacitores cerámicos de capas múltiples.

Se emplean capacitores de chip cerámico en algunos circuitos electrónicos híbridos de película gruesa y base cerámica. Los capacitores de chip pueden proporcionar una capacitancia bastante mayor por área unitaria y es posible agregarlos al circuito de película gruesa mediante una simple operación de soldadura o enlace.

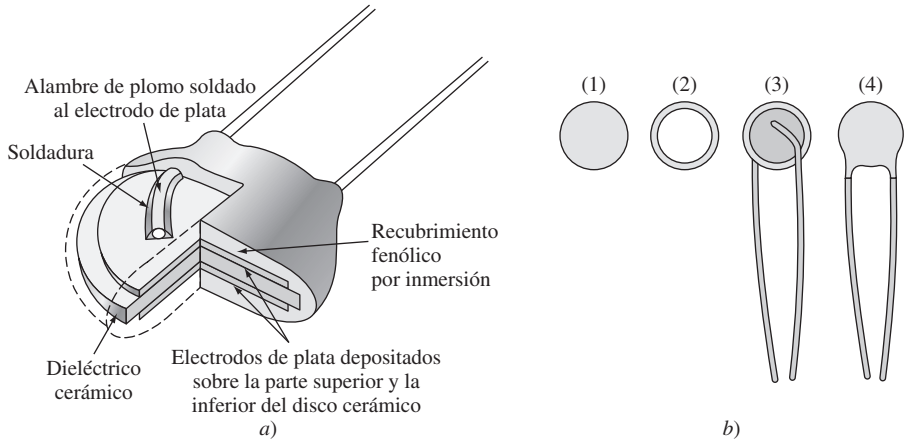


Figura 14.55
Capacitores cerámicos. *a*) Sección que muestra la construcción. *(Cortesía de Sprague Products Co.)*
b) Etapas en la manufactura: 1) después de recocer el disco cerámico; 2) después de aplicar electrodos de plata; 3) después de soldar las puntas de conexión; 4) después de aplicar un recubrimiento fenólico por inmersión. *(Cortesía de Radio Materials Co.)*

Tabla 14.8 Formulaciones representativas de algunos materiales dieléctricos cerámicos para capacitores

Constante dieléctrica κ	Formulación
325	$BaTiO_3$ + $CaTiO^3$ + bajo % $Bi_2Sn_3O_9$
2100	$BaTiO_3$ + bajo % $CaZrO_3$ y Nb_2O_5
6500	$BaTiO_3$ + bajo % $CaZrO_3$ o $CaTiO^3$ + $BaZrO_3$

Fuente: C. A. Harper (ed.), *Handbook of Material and Processes for Electronics,* McGraw-Hill, 1970, pp. 6-61.

14.8.4 Semiconductores cerámicos

Algunos compuestos cerámicos tienen propiedades semiconductoras que son importantes en la operación de ciertos dispositivos eléctricos. Uno de estos dispositivos es el **termistor**, o resistor sensible térmicamente, que se usa en la medición y control de temperatura. En esta discusión interesa el tipo de termistor de *coeficiente de temperatura negativa* (CTN), cuya resistencia disminuye con el aumento de la temperatura. Esto es, cuando crece la temperatura, el termistor se vuelve más conductivo, como en el caso de un semiconductor de silicio.

Los materiales semiconductores cerámicos que se usan de manera más común en termistores de CTN son óxidos aglutinados de los elementos Mn, Ni, Fe, Co y Cu. Las combinaciones en solución-sólida de lo óxidos de estos elementos se utilizan para obtener el intervalo necesario de conductividades eléctricas con cambios de temperatura.

Se considerará primero el compuesto cerámico magnetita, Fe_3O_4, que tiene una resistividad relativamente baja de casi $10^{-5}\ \Omega \cdot m$ cuando se compara con un valor de alrededor de $10^{8}\ \Omega \cdot m$ para los óxidos metálicos de transición más regulares.

Fe_3O_4 tiene la estructura de espinela inversa con la composición $FeO \cdot Fe_2O_3$ que puede escribirse como

$$Fe^{2+}(Fe^{3+}, Fe^{3+})O_4$$

En esta estructura los iones de oxígeno ocupan sitios de red FCC, con los iones de Fe^{2+} en sitios octaédricos y la mitad de los iones Fe^{3+} en sitios octaédricos y la mitad en sitios tetraédricos. La buena conductividad eléctrica del Fe_3O_4 se atribuye a la localización aleatoria de los iones de Fe^{2+} y Fe^{3+} en los sitios octaédricos, por lo que los "brincos" (transferencia) de electrones puede ocurrir entre los iones Fe^{2+} y los Fe^{3+} mientras se mantiene la neutralidad de carga. La estructura del Fe_3O_4 se analiza de manera adicional en la sección 16.9.

Las conductividades eléctricas de compuestos semiconductores de óxido metálico para termistores pueden controlarse formando soluciones sólidas de diferentes compuestos de óxidos metálicos. Al combinar un óxido metálico de baja conductividad con uno de alta conductividad con una estructura similar, es posible producir un compuesto semiconductor con una conductividad intermedia. Este efecto se ilustra en la figura 14.56, en la que se muestra cómo la conductividad del Fe_3O_4 se re-

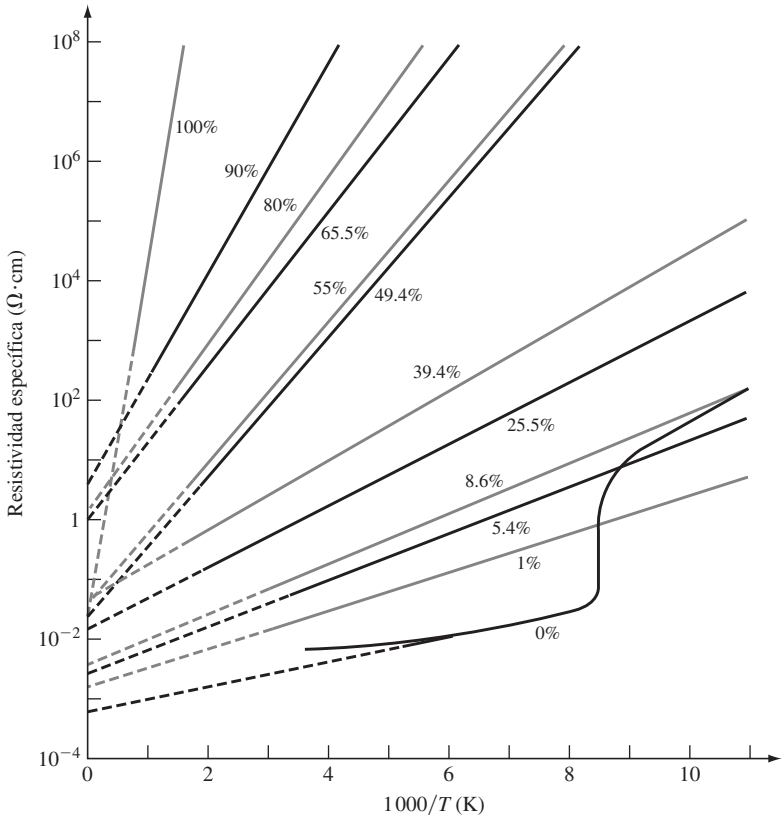
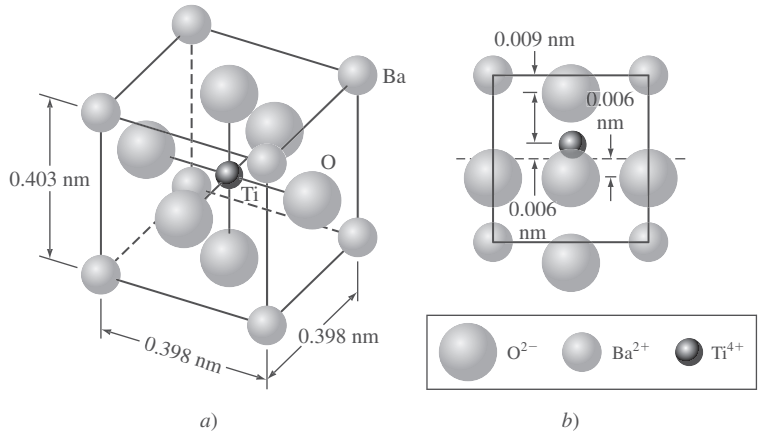


Figura 14.56
Resistividad específica de la solución sólida de Fe_3O_4 y $MgCr_2O_4$. El porcentaje de moles de $MgCr_2O_4$ se indica sobre las curvas.
[Tomado de E. J. Verwey, P. W. Haagman y F. C. Romeijn, J. Chem. Phys., **15:***18(1947).]*



MatVis

Figura 14.57
a) La estructura del $BaTiO_3$ arriba de 120°C es cúbica. *b*) La estructura del $BaTiO_3$ debajo de 120°C (su temperatura de Curie) es un tetragonal debido a un ligero corrimiento del ion central Ti^{4+} con respecto a los iones O^{2-} de la celda unitaria que lo rodean. En esta celda unitaria asimétrica se presenta un pequeño momento dipolar eléctrico.
(Tomado de K. M. Ralls, T. H. Courtney y J. Wulff, "An Introduction to Materials Science and Engineering", Wiley, 1976, p. 610.)

duce de manera gradual agregando cantidades crecientes en la solución sólida de $MgCr_2O_4$. La mayoría de los termistores de CTN con coeficientes de resistividad de temperatura controlada se elaboran a partir de soluciones sólidas de óxidos de Mn, Ni, Fe y Co.

14.8.5 Cerámicas ferroeléctricas

Dominios ferroeléctricos Algunos materiales cristalinos iónicos cerámicos tienen celdas unitarias que no cuentan con un centro de simetría, y por ello sus celdas unitarias contienen un pequeño dipolo eléctrico y reciben el nombre de ferroeléctricos. Un material cerámico industrialmente importante en esta clase es el titanato de bario, $BaTiO_3$. Arriba de los 120°C, este material tiene una estructura cristalina de perovskita simétrica cúbica regular $BaTiO_3$ (figura 14.57*a*). Por debajo de 120°C, el ion de $BaTiO_3$ central y los iones de Ti^{4+} alrededor de la celda unitaria de O^{2-} se corren ligeramente en direcciones opuestas para crear un pequeño momento dipolar eléctrico (figura 14.57*b*). Este corrimiento de las posiciones de iones a la temperatura crítica de 120°C, denominada la **temperatura de Curie**, cambia la estructura cristalina del $BaTiO_3$ de cúbica a tetragonal.

A una mayor escala, el material cerámico de titanato de bario sólido tiene una estructura de dominios (figura 14.58) en la cual los pequeños dipolos eléctricos de las celdas unitarias se alinean en una dirección. El momento dipolar resultante de un volumen unitario de este material es la suma de los pequeños momentos dipolares de las celdas unitarias. Si el titanato de bario policristalino se enfría lentamente

Figura 14.58
Microestructura de la cerámica de titanato de bario que muestra diferentes orientaciones de los dominios ferroeléctricos, los cuales se revelan por medio de grabado. (Amplificación 500×.)
[Tomado de R. D. DeVries y J. E. Burke, J. Am. Ceram. Soc., **40:***200 (1957).]*

desde su temperatura de Curie en la presencia de un campo eléctrico intenso, los dipolos de todos los dominios tienden a alinearse en la dirección del campo eléctrico para producir un intenso momento dipolar por volumen unitario del material.

El efecto piezoeléctrico[6] El titanato de bario y muchos otros materiales cerámicos exhiben lo que se llama el **efecto piezoeléctrico** (**PZT**), ilustrado de manera esquemática en la figura 14.59. Se considerará una muestra de material cerámico ferroeléctrico que tiene un momento dipolar resultante debido al alineamiento de muchos dipolos unitarios pequeños, como se indica en la figura 14.59*a*. En este material habrá un exceso de carga positiva en un extremo y de carga negativa en el otro extremo en la dirección de la polarización. Ahora se considerará la muestra cuando se aplican esfuerzos compresivos, como se muestra en la figura 14.59*b*. Los esfuerzos compresivos reducen la longitud de la muestra entre los esfuerzos aplicados y de ese modo reducen la distancia entre los dipolos unitarios, lo cual, a su vez, disminuye el momento dipolar total por volumen unitario del material. El cambio en el momento dipolar del material altera la densidad de carga en los extremos de la muestra y por ello modifica la diferencia de voltaje entre los extremos de la muestra si éstos están aislados uno del otro.

[6] El prefijo *piezo-* significa "presión" y proviene de la palabra griega "*piezein*", que significa "presionar".

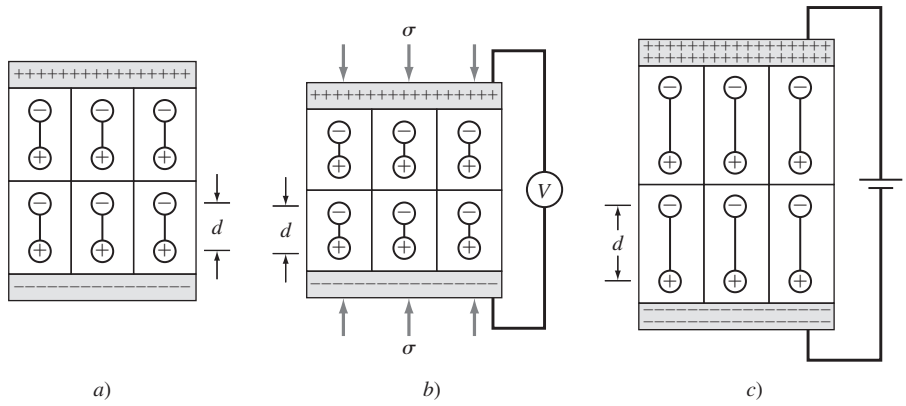


Figura 14.59
a) Ilustración esquemática de dipolos eléctricos dentro de un material piezoeléctrico. *b*) Esfuerzos comprensivos sobre el material ocasionan que se desarrolle una diferencia de voltaje debida al cambio en los dipolos eléctricos. *c*) El voltaje aplicado entre los extremos de una muestra provoca un cambio dimensional y cambia el momento dipolar eléctrico.
(Tomado de L. H. Van Vlack, "Elements of Materials Science and Engineering", 4a. ed., Addison-Wesley, 1980, Fig. 8-6.3, p. 305.)

Por otro lado, si se aplica un campo eléctrico entre los extremos de una muestra, la densidad de carga en cada extremo de la misma cambiará (figura 14.59*c*). Este cambio en la densidad de carga provocará el cambio de dimensiones de la muestra en la dirección del campo aplicado. En el caso de la figura 14.59*c* la muestra está un poco elongada debido a una cantidad creciente de carga positiva que atrae a los polos negativos de los dipolos, y lo inverso en el otro extremo de la muestra. De este modo, el efecto piezoeléctrico es un efecto electromecánico por medio del cual las fuerzas mecánicas sobre un material ferroeléctrico pueden producir una respuesta eléctrica, o las fuerzas eléctricas una respuesta mecánica.

Las cerámicas piezoeléctricas tienen muchas aplicaciones industriales. Ejemplos para el caso de la conversión de fuerzas mecánicas en respuestas eléctricas son el acelerómetro de compresión piezoeléctrica (figura 14.60*a*), que puede medir aceleraciones vibratorias que ocurren sobre una amplia gama de frecuencias, y el cartucho fonográfico en el cual las respuestas eléctricas son "captadas" a partir de una aguja que vibra en los surcos de grabación. Un ejemplo del caso de la conversión de fuerzas eléctricas en respuestas mecánicas es el **transductor** de limpieza ultrasónica que se pone a vibrar mediante una entrada de potencia de CA, de manera que puede inducir la violenta agitación del líquido en un tanque (figura 14.60*b*). Otro ejemplo de este tipo es el transductor de sonido submarino en el cual la entrada de potencia eléctrica provoca que el transductor vibre para transmitir ondas sonoras.

Materiales piezoeléctricos Aunque el $BaTiO_3$ se usa de modo común como un material piezoeléctrico, se ha sustituido en gran medida por otros materiales cerámicos piezoeléctricos. De particular importancia son los materiales cerámicos hechos de

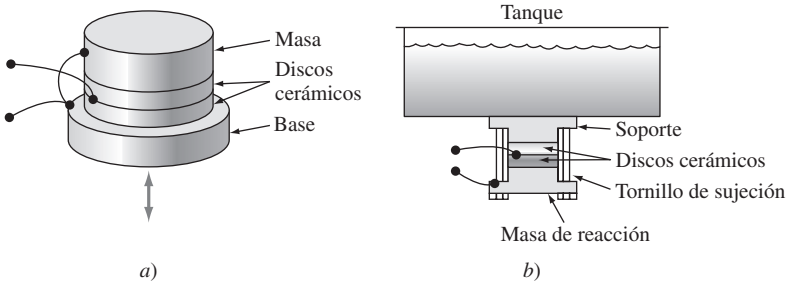


Figura 14.60
a) Acelerómetro de compresión piezoeléctrica. *b*) Elementos cerámicos piezoeléctricos en un aparato de limpieza ultrasónica.
(Cortesía de la Vernitron Piezoelectric Division, Bedford, Ohio.)

soluciones sólidas de circonato de plomo ($PbZrO_3$) y de titanato de plomo ($PbTiO_3$) para producir lo que se llama *cerámicas PZT*. Los materiales PZT tienen una amplia variedad de propiedades piezoeléctricas, incluyendo una temperatura de Curie más alta que el $BaTiO_3$.

14.9 NANOELECTRÓNICA

La capacidad para caracterizar y estudiar nanomateriales y nanodispositivos ha mejorado de manera significativa con el advenimiento de técnicas de *microscopio de sonda luminosa* (SPM, por sus siglas en inglés) (capítulo 4). Los investigadores han demostrado que al variar el voltaje impuesto entre la punta del STM y la superficie, es posible recoger un átomo (o cúmulo de átomos) y manipular su posición en la superficie. Por ejemplo, los científicos han utilizado el STM para crear enlaces colgantes (incompletos) sobre la superficie de silicio en posiciones específicas. Luego, exponiendo la superficie de la muestra a gases que contienen moléculas de interés, estos enlaces colgantes pueden convertirse en los sitios de adsorción molecular. Al ubicar los enlaces colgantes y en consecuencia las moléculas adsorbidas en puntos específicos sobre la superficie, es posible diseñar electrónica molecular a nanoescala. Otro ejemplo del uso del STM en nanotecnología es la formación de *pozos cuánticos*. El STM se usa para ubicar átomos metálicos sobre la superficie en una forma circular o elíptica. Puesto que los electrones se confinan en la trayectoria de los átomos metálicos, se forma un pozo cuántico que representa una "zona caliente" de ondas electrónicas. Esto es similar a una zona caliente de ondas electromagnéticas en una antena de plato. El tamaño del pozo es de décimos de nanómetros. Si un átomo magnético tal como uno de cobalto se coloca en un punto focal en un pozo elíptico con dos puntos focales, algunas de sus propiedades (por ejemplo, un cambio en los electrones de la superficie debido al magnetismo del cobalto) aparecen en el otro punto focal (figura 14.61). Por otro lado, si un solo átomo se ubica en posiciones no focales, sus propiedades no se presentarán en ninguna otra parte en el pozo. El punto en el cual el pozo cuántico se forma se conoce como *un espejismo cuántico*, el cual se considera como un vehículo para transferir datos en la escala de los na-

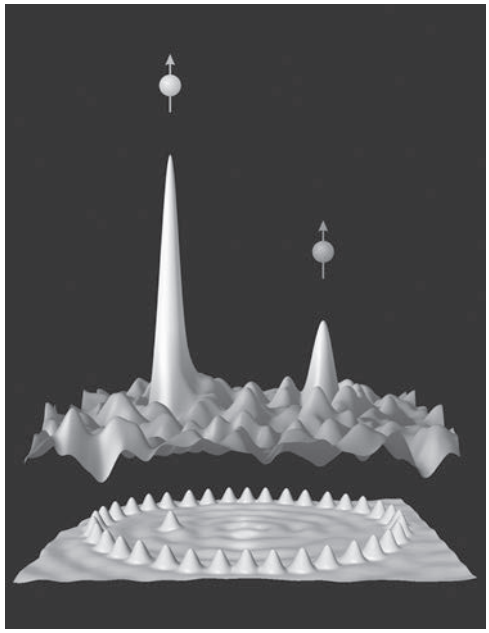


Figura 14.61
En esta figura un solo átomo de cobalto se ubica en uno de los puntos focales del pozo elíptico de átomos de cobalto 36 (pico izquierdo). Algunas de sus propiedades aparecen después en el otro punto focal (pico derecho) donde no existen átomos.
(IBM Research, Almaden Research Center.)

nointervalos. Si bien esto puede ser factible dentro de muchos años, la meta final es establecer técnicas que permitan entregar corriente en nanodispositivos donde el alambrado eléctrico convencional es imposible debido a las pequeñas dimensiones.

14.10 RESUMEN

En el modelo clásico de la conducción eléctrica en metales, se supone que los electrones de valencia exteriores de los átomos del metal tienen la libertad de moverse entre los núcleos de iones positivos (átomos sin sus electrones de valencia) de la red metálica. En presencia de un potencial eléctrico aplicado, los electrones libres alcanzan una velocidad de arrastre dirigida. El movimiento de los electrones y de su carga eléctrica asociada en un metal constituye una corriente eléctrica. Por convención, la corriente eléctrica se considera como un flujo de carga positiva, el cual está en dirección opuesta al flujo de electrones.

En el modelo de bandas de energía para la conducción eléctrica en metales, los electrones de valencia de los átomos de metal interactúan y se interpenetran entre sí para formar bandas de energía. Puesto que se trasladan las bandas de energía de los electrones de valencia de los átomos metálicos, produciendo bandas de energía compuestas parcialmente llenas, se requiere muy poca energía para excitar a los electrones de energía más alta de manera que tengan libertad de ser conductores. En los aislantes, los electrones de valencia están firmemente ligados a sus átomos mediante enlaces iónicos y covalentes y no tienen la libertad de conducir electricidad a menos que se energicen de manera considerable. El modelo de bandas de energía para un aislador consiste en una banda de valencia inferior llena y en una banda de conducción superior vacía. La banda de valencia está separada de la banda de conducción por una brecha de energía (alrededor de 6 a 7 eV, por ejemplo). De este modo, para que los aisladores sean conductores, debe aplicarse una gran cantidad de energía para ocasionar que los electrones de valencia "salten" la brecha. Los semiconductores intrínsecos tienen una brecha de energía relativamente pequeña (es decir, alrededor de 0.7 a 1.1 eV) entre sus bandas de valencia y de conducción. Al impurificar los semiconductores intrínsecos con átomos de impurezas para hacerlos extrínsecos, la cantidad de energía que se requiere para conseguir que los semiconductores sean conductores se reduce de manera considerable.

Los semiconductores extrínsecos pueden ser de tipo n o de tipo p. Los de tipo n (negativos) tienen electrones como sus portadores mayoritarios. Los de tipo p (positivo) tienen huecos (electrones faltantes) como sus portadores de carga mayoritarios. Al fabricar uniones pn en un solo cristal de un semiconductor como el silicio, es posible construir varios tipos de dispositivos semiconductores. Por ejemplo, los diodos de unión pn y los transistores npn pueden producirse utilizando estas uniones. La tecnología microelectrónica moderna se ha desarrollado a tal grado que miles de transistores pueden colocarse en un "chip" de silicio semiconductor menor que 0.5 cm cuadrados y casi de 0.2 mm de espesor. La compleja tecnología microelectrónica ha posibilitado microprocesadores y memorias de computadora muy sofisticados.

Los materiales cerámicos suelen ser buenos aislantes eléctricos y térmicos debido a la ausencia de electrones de conducción, y, por ello, muchas cerámicas se utilizan en el aislamiento eléctrico y los refractarios. Algunos materiales cerámicos pueden polarizarse de modo considerable con carga eléctrica y se usan para materiales dieléctricos en capacitores. La polarización permanente de algunos materiales cerámicos produce propiedades piezoeléctricas que permiten que estos materiales se utilicen como transductores electromecánicos. Otros materiales cerámicos, por ejemplo, el Fe_3O_4, son semiconductores y encuentran aplicación como termistores en mediciones de temperatura.

La investigación en nanotecnología avanza hacia la fabricación de dispositivos electrónicos con dimensiones de nanómetros. Se prevé que los pozos cuánticos entregarán corrientes en nanodispositivos donde es imposible el alambrado eléctrico.

14.11 DEFINICIONES

Sección 14.1

Corriente eléctrica: la velocidad del paso de carga a través de un material; la corriente eléctrica i es el número de culombios por segundo que pasa por un punto en un material. La unidad del SI para la corriente eléctrica es el ampere (1 A = 1 C/s).

Resistencia eléctrica *R*: la medida de la dificultad del paso de la corriente eléctrica a través de un volumen de material. La resistencia aumenta con la longitud y con la reducción del área de la sección transversal del material a través del cual pasa la corriente. Unidad del SI: ohm (Ω).

Resistividad eléctrica ρ_e: medida de la dificultad del paso de la corriente eléctrica a través de un volumen *unitario* de material. Para un volumen de material, $\rho_e = RA/l$, donde R = resistencia del material, Ω; l = su longitud, m; A = el área de su sección transversal, m^2. En unidades del SI, $\rho_e = (\Omega \cdot m)$.

Conductividad eléctrica σ_e: medida de la facilidad con la cual la corriente eléctrica pasa a través de un volumen unitario de material. Unidades: $(\Omega \cdot m)^{-1}$. σ_e es el inverso de ρ_e.

Conductor eléctrico: material con una alta conductividad eléctrica. La plata es un buen conductor y tiene una $\sigma_e = 6.3 \times 10^7\ (\Omega \cdot m)^{-1}$.

Aislador eléctrico: material con una baja conductividad eléctrica. El polietileno es un conductor pobre y tiene una $\sigma_e = 10^{-15}$ a $10^{-17}\ (\Omega \cdot m)^{-1}$.

Semiconductor: material cuya conductividad eléctrica está casi a la mitad entre los valores para buenos conductores y aisladores. Por ejemplo, el silicio puro es un elemento semiconductor y tiene $\sigma_e = 4.3 \times 10^{-4}\ (\Omega \cdot m)^{-1}$ a 300 K.

Densidad de corriente eléctrica J: la corriente eléctrica por área unitaria. Unidades de SI: amperes/$metro^2$ (A/m^2).

Sección 14.2

Modelo de bandas de energía: en este modelo las energías de los electrones de valencia de enlace de los átomos de un sólido forman una banda de energías. Por ejemplo, los electrones de valencia 3*s* en un pedazo de sodio forman una banda de energía 3*s*. Puesto que hay sólo un electrón 3*s* (el orbital 3*s* puede contener dos electrones), la banda de energía 3*s* en el metal de sodio está medio llena.

Banda de valencia: la banda de energía que contiene a los electrones de valencia. En un conductor la banda de valencia es también la banda de conducción. La banda de valencia en un metal conductor no está llena, y por ello algunos electrones pueden energizarse hasta niveles dentro de la banda de valencia y convertirse en electrones de conducción.

Banda de conducción: los niveles de energía no llenos en los cuales los electrones pueden excitarse para convertirse en electrones de conducción. En semiconductores y aisladores hay una brecha de energía entre la banda de valencia inferior llena y la banda de conducción superior vacía.

Sección 14.3

Semiconductor intrínseco: material semiconductor que es esencialmente puro y para el cual la brecha de energía es suficientemente pequeña (alrededor de 1 eV) para que la supere la excitación térmica: los portadores de corriente son electrones en la banda de conducción y los huecos en la banda de valencia.

Electrón: portador de carga negativo con una carga de 1.60×10^{-19} C.

Hueco: portador de carga positivo con una carga de 1.60×10^{-19} C.

Sección 14.4

Semiconductor extrínseco de tipo n: material semiconductor que se ha impurificado con un elemento tipo n (por ejemplo, silicio impurificado con fósforo). Las impurezas de tipo n donan electrones que tienen energías cercanas a la banda de conducción.

Niveles de donador: en la teoría de bandas, niveles de energía locales cercanos a la banda de conducción.

Semiconductor extrínseco tipo p: material semiconductor que se ha impurificado con un elemento tipo p (por ejemplo, silicio impurificado con aluminio). Las impurezas tipo p proporcionan huecos de electrones cercanos al nivel de energía superior de la banda de valencia.

Niveles de aceptor: en la teoría de bandas, niveles de energía locales cercanos a la banda de valencia.

Portadores mayoritarios: el tipo de portador de carga que prevalece en un semiconductor; los portadores mayoritarios en un semiconductor tipo n son electrones de conducción, en un semiconductor tipo p son huecos de conducción.

Portadores minoritarios: el tipo de portador de carga en la concentración más baja en un semiconductor. Los portadores minoritarios en los semiconductores tipo n son electrones, y en los semiconductores tipo p son huecos.

Sección 14.5

Unión pn: unión abrupta o frontera entre regiones tipo p y tipo n dentro de un cristal de un material semiconductor.

Polarización: voltaje aplicado a dos electrodos de un dispositivo electrónico.

Polarización directa: polarización aplicada a una unión pn en la dirección de conducción; en una unión pn bajo polarización directa, los electrones y huecos de los portadores mayoritarios fluyen hacia la unión de manera que circula una gran corriente.

Polarización inversa: polarización aplicada a una unión pn de manera que fluye poca corriente; en una unión pn bajo polarización inversa los electrones y huecos de los portadores mayoritarios fluyen alejándose de la unión.

Diodo rectificador: diodo de unión pn que convierte la corriente alterna en corriente directa (CA en CD).

Transistor de unión bipolar: dispositivo semiconductor de dos uniones y tres elementos. Los tres elementos básicos del transistor son el emisor, la base y el colector. Los transistores de unión bipolar pueden ser de tipos npn o pnp. La unión emisor-base se polariza directamente y la unión colector-base se polariza inversamente, de manera que el transistor puede actuar como un dispositivo de amplificación de corriente.

Sección 14.8

Dieléctrico: material aislador eléctrico.

Capacitor: dispositivo eléctrico compuesto por dos placas o láminas separadas por capas de material dieléctrico y capaz de almacenar carga eléctrica.

Capacitancia: medida de la capacidad de un capacitor para almacenar carga eléctrica. La capacitancia se mide en faradios. Las unidades utilizadas comúnmente en la circuitería eléctrica son los picofaradios ($1\ \text{pF} = 10^{-12}\ \text{F}$) y el microfaradio ($1\ \mu\text{F} = 10^{-6}\ \text{F}$).

Constante dieléctrica: el cociente entre la capacitancia de un capacitor utilizando un material entre sus placas comparado con la del capacitor cuando hay vacío entre las placas.

Resistencia dieléctrica: el voltaje por longitud unitaria (campo eléctrico) al cual un material dieléctrico permite la conducción; esto es, el campo eléctrico máximo que un dieléctrico puede soportar sin ruptura eléctrica.

Termistor: dispositivo semiconductor cerámico en el que cambia la resistividad cuando varía la temperatura y se utiliza para medir y controlar esta misma.

Material ferroeléctrico: material que puede polarizarse aplicando un campo eléctrico.

Polarización: el alineamiento de pequeños dipolos eléctricos en un material dieléctrico para producir un momento dipolar neto en el material.

Temperatura de Curie (de un material ferroeléctrico): la temperatura a la cual un material ferroeléctrico en enfriamiento experimenta un cambio de estructura cristalina que produce la polarización espontánea en el material. Por ejemplo, la temperatura de Curie del $BaTiO_3$ es 120°C.

Efecto piezoeléctrico: efecto electromecánico mediante el cual las fuerzas mecánicas en un material ferroeléctrico pueden producir una respuesta eléctrica y las fuerzas eléctricas, una respuesta mecánica.

Transductor: dispositivo que actúa mediante la potencia de una fuente y transmite potencia en otra forma a un segundo sistema. Por ejemplo, un transductor puede convertir energía sonora de entrada en una respuesta eléctrica de salida.

14.12 PROBLEMAS

Las repuestas a los problemas marcados con un asterisco se encuentran al final del libro.

14.1 Describa el modelo clásico para la conducción eléctrica en metales.

14.2 Distinga entre *a*) núcleos de iones positivos y *b*) electrones de valencia en una red cristalina metálica tal como el sodio.

14.3 Escriba ecuaciones para las formas *a*) macroscópica y *b*) microscópica de la ley de Ohm. Defina los símbolos en cada una de las ecuaciones e indique sus unidades del SI.

14.4 ¿Cómo se relacionan numéricamente la conductividad eléctrica con la resistividad eléctrica?

14.5 Indique dos tipos de unidades del SI para la conductividad eléctrica.

14.6 Calcule la resistencia de una barra de hierro de 0.720 cm de diámetro y 0.850 m de largo a 20°C. [$\rho_e(20°C) = 10.0 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot$ cm.]

***14.7** Un alambre de nicromio debe tener una resistencia de 120 Ω. ¿Qué longitud debe tener (en metros) si tiene un diámetro de 0.0015 pulgadas? [σ_e (nicromio) $= 9.3 \times 10^5\ (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$.]

14.8 Un alambre de 0.40 cm de diámetro debe conducir una corriente de 25 A.

a) Si la máxima disipación de potencia a lo largo del alambre es 0.025 W/cm, ¿cuál es la conductividad eléctrica mínima permisible del alambre (indique la respuesta en unidades del SI)?

b) ¿Cuál es la densidad de corriente en el alambre?

14.9 Un alambre de hierro conducirá una corriente de 6.5 A con una caída de voltaje máxima de 0.005 V/cm. ¿Cuál debe ser el diámetro mínimo del alambre en metros a 20°C?

14.10 Defina las siguientes cantidades relativas al flujo de electrones en un conductor metálico: *a*) velocidad de arrastre; *b*) tiempo de relajación; y *c*) movilidad de electrones.

14.11 ¿Cuál es la causa de que la resistividad eléctrica de un metal aumente cuando se incrementa su temperatura? ¿Qué es un fonón?

14.12 ¿Qué defectos estructurales contribuyen al componente residual de la resistividad eléctrica de un metal puro?

14.13 ¿Qué efectos tienen los elementos que forman las soluciones sólidas en las resistividades eléctricas de metales puros?

***14.14** Calcule la resistividad eléctrica (en ohm-metros) de un alambre de plata de 15 m de largo y 0.030 m de diámetro a 160°C. [ρ_e(Fe a 0°C) $= 9.0 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot$ cm.]

***14.15** ¿A qué temperatura un alambre de hierro tendrá la misma resistividad eléctrica que uno de aluminio a 35°C?

14.16 ¿A qué temperatura la resistividad eléctrica de un alambre de hierro será $25.0 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot$ m?

14.17 ¿Por qué los niveles de energía de los electrones de valencia se amplían en bandas en un bloque sólido de un buen metal conductor como el sodio?

14.18 ¿Por qué los niveles de energía de los electrones del núcleo interior de un bloque de metal de sodio no forman también bandas de energía?

14.19 ¿Por qué la banda de energía de los electrones 3*s* en un bloque de sodio sólo está medio llena?

14.20 ¿Cuál es la explicación que se da para la buena conductividad eléctrica del magnesio y del aluminio aun cuando estos metales tienen llenas sus bandas de energía 3*s* exteriores?

14.21 ¿Cómo explica el modelo de bandas de energía la pobre conductividad eléctrica de un aislador como el diamante puro?

14.22 Defina un semiconductor intrínseco. ¿Cuáles son los dos elementos semiconductores más importantes?

14.23 ¿Qué tipo de enlace tiene la estructura cúbica del diamante? Realice un dibujo bidimensional del enlace en la red de silicio y demuestre cómo los pares electrón-hueco se producen en presencia de un campo aplicado.

14.24 ¿Por qué se dice que un hueco es una partícula imaginaria? Utilice un dibujo para mostrar cómo los huecos de electrones pueden moverse en una red cristalina de silicio.

14.25 Defina la movilidad de electrones y de huecos de electrones como si correspondiera al movimiento de carga en una red de silicio. ¿Cómo se miden estas cantidades y cuáles son sus unidades del SI?

14.26 Explique, utilizando un diagrama de bandas de energía, cómo los electrones y los huecos de electrones se crean en pares en silicio intrínseco.

14.27 ¿Cuál es el cociente de la movilidad del electrón-hueco en el silicio y el germanio?

14.28 Calcule el número de átomos de germanio por metro cúbico.

***14.29** Calcule la resistividad eléctrica del germanio a 300 K.

14.30 Explique por qué la conductividad eléctrica del silicio y el germanio intrínseco aumenta con el incremento de temperatura.

14.31 La resistividad eléctrica del germanio puro es $0.46\ \Omega \cdot \text{m}$ a 300 K. Calcule su conductividad eléctrica a 425°C.

***14.32** La resistividad eléctrica del silicio puro es $2.3 \times 10^3\ \Omega \cdot \text{m}$ a 300 K. Calcule su conductividad eléctrica a 325°C.

14.33 Defina semiconductores de silicio extrínsecos de tipo n y de tipo p.

14.34 Dibuje dos redes bidimensionales de silicio del siguiente tipo:

a) red de tipo n con un átomo de impurezas de arsénico presente.

b) red de tipo p con un átomo de impureza de boro presente.

14.35 Dibuje diagramas de bandas de energía que muestren los niveles de donador o aceptor para lo siguiente:

a) silicio tipo n con átomos de impurezas de fósforo.

b) silicio tipo p con átomos de impurezas de boro.

14.36 *a*) Cuando un átomo de fósforo se ioniza en una red de silicio tipo n, ¿qué carga adquiere el átomo ionizado?

b) Cuando un átomo de boro se ioniza en una red de silicio tipo p, ¿qué carga adquiere el átomo ionizado?

14.37 ¿Qué son los impurificadores en los semiconductores? Explique el proceso de impurificación mediante difusión.

14.38 ¿Cuáles son los portadores mayoritarios y minoritarios en un semiconductor de silicio tipo n? ¿En uno tipo p?

***14.39** Una oblea de silicio se impurifica con 7.0×10^{21} átomos de fósforo/m^3. Calcule *a*) las concentraciones de electrones y huecos después de la impurificación y *b*) la resistividad eléctrica resultante a 300 K. [Suponga $n_i = 1.5 \times 10^{16}/\text{m}^3$ y $\mu_n = 0.1350\ \text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$.]

14.40 Se añade fósforo para hacer un semiconductor de silicio tipo n con una conductividad eléctrica de 250 $\Omega \cdot m^{-1}$. Calcule el número necesario de portadores de carga que se requieren.

14.41 Un semiconductor se elabora agregando boro a silicio para producir una resistividad eléctrica de 1.90 $\Omega \cdot m$. Calcule la concentración de portadores por metro cúbico en el material. [Suponga $\mu_p = 0.048\ m^2/(V \cdot s)$.]

14.42 Una oblea de silicio se impurifica con 2.50×10^{16} átomos de boro/cm^3 más 1.60×10^{16} átomos de fósforo/cm^3 a 27°C. Calcule *a*) las concentraciones de electrones y huecos (portadores por centímetro cúbico), *b*) las movilidades de electrones y huecos (recurra a la figura 14.26) y *c*) la resistividad eléctrica del material.

14.43 Una oblea de silicio se impurifica con 2.50×10^{15} átomos de fósforo/cm^3, 3.00×10^{17} átomos de boro/cm^3 y 3.00×10^{17} átomos de arsénico/cm^3. Calcule *a*) las concentraciones de electrones y huecos (portadores por centímetro cúbico), *b*) las movilidades de electrones y huecos (recurra a la figura 14.26) y *c*) la resistividad eléctrica del material.

***14.44** Una oblea de silicio impurificada con arsénico tiene una resistividad eléctrica de $7.50 \times 10^{-4}\ \Omega \cdot cm$ a 27°C. Suponga movilidades de portador intrínsecas e ionización completa.

a) ¿Cuál es la concentración de portadores mayoritarios (portadores por centímetro cúbico)?

b) ¿Cuál es la proporción entre los átomos de arsénico y los de silicio en este material?

14.45 Una oblea de silicio impurificada con boro tiene una resistividad eléctrica de $5.00 \times 10^{-4}\ \Omega \cdot cm$ a 27°C. Suponga movilidades de portador intrínsecas y ionización completa.

a) ¿Cuál es la concentración de portadores mayoritarios (portadores por centímetro cúbico)?

b) ¿Cuál es la proporción entre los átomos de boro y los de silicio en este material?

14.46 Describa el origen de las tres etapas que aparecen en la gráfica de ln σ *versus* $1/T$ para un semiconductor de silicio extrínseco (que va de bajas a altas temperaturas). ¿Por qué disminuye la conductividad justo antes del rápido aumento debido a la conductividad intrínseca?

14.47 Defina el término *microprocesador*.

14.48 Describa el movimiento de portadores mayoritarios en un diodo de unión pn en equilibrio. ¿Qué es la región de agotamiento de una unión pn?

14.49 Describa el movimiento de portadores mayoritarios y minoritarios en un diodo de unión pn bajo polarización inversa.

14.50 Describa el movimiento de los portadores mayoritarios en un diodo de unión pn bajo polarización directa.

14.51 Describa cómo un diodo de unión pn puede funcionar como un rectificador de corriente.

14.52 ¿Qué es un diodo zener? ¿Cómo funciona este dispositivo? Describa un mecanismo para explicar su operación.

14.53 ¿Cuáles son los tres elementos básicos de un transistor de unión bipolar?

14.54 Describa el flujo de electrones y huecos cuando un transistor de unión bipolar npn funciona como un amplificador de corriente.

14.55 ¿Qué técnicas de fabricación se utilizan para estimular a los electrones del emisor de un transistor bipolar npn para que pasen de manera directa al colector?

14.56 ¿Por qué un transistor de unión bipolar se denomina bipolar?

14.57 Describa la estructura de un transistor bipolar npn.

14.58 Describa cómo un transistor bipolar plano puede funcionar como un amplificador de corriente.

14.59 Describa la estructura de un transistor de efecto de campo de semiconductor de óxido metálico tipo n.

14.60 ¿Cómo funciona los NMOS como amplificadores de corriente?

14.61 Describa los pasos fotolitográficos necesarios para producir un patrón de una capa aislante de óxido de silicio sobre una superficie de silicio.

14.62 Describa el proceso de difusión en la introducción de impurificadores dentro de la superficie de una oblea de silicio.

14.63 Describa el proceso de implantación de iones en la introducción de impurificadores dentro de la superficie de una oblea de silicio.

14.64 Describa el proceso general para fabricar circuitos integrados NMOS sobre una oblea de silicio.

14.65 ¿Por qué se usa nitruro de silicio (Si_3N_4) en la producción de circuitos integrados NMOS sobre una oblea de silicio?

14.66 ¿Cuáles son los dispositivos semiconductores de óxido metálico complementario? ¿Cuáles son las ventajas de los dispositivos CMOS sobre los NMOS o PMOS?

***14.67** Calcule la conductividad eléctrica intrínseca del GaAs a 125°C. [$E_g = 1.47$ eV; $\mu_n = 0.720\ m^2/(V \cdot s)$; $\mu_p = 0.020\ m^2/(V \cdot s)$; $n_i = 1.4 \times 10^{12}\ m^{-3}$.]

14.68 Calcule la conductividad eléctrica intrínseca del InSb a 60°C y a 70°C [$E_g = 0.17$ eV; $\mu_n = 8.00\ m^2/(V \cdot s)$; $\mu_p = 0.045\ m^2/(V \cdot s)$; $n_i = 1.35 \times 10^{22}\ m^{-3}$.]

14.69 Calcule la conductividad eléctrica intrínseca de *a*) GaAs y *b*) InSb a 75°C.

***14.70** ¿Qué fracción de la corriente conducen *a*) electrones y *b*) huecos en 1) InSb, 2) InB y 3) InP a 27°C?

14.71 ¿Qué fracción de la corriente la transportan *a*) electrones y *b*) huecos en 1) GaSb y 2) GaB a 27°C?

14.72 ¿Cuáles son las tres principales aplicaciones de los materiales cerámicos en las industrias eléctrica-electrónica?

14.73 Defina los términos *dieléctrico, capacitor* y *capacitancia*. ¿Cuál es la unidad del SI para la capacitancia? ¿Qué unidades se usan comúnmente para la capacitancia en la industria electrónica?

14.74 ¿Cuál es la constante dieléctrica de una material dieléctrico? ¿Cuál es la relación entre la capacitancia, la constante dieléctrica y el área y la distancia de separación entre las placas de un capacitor?

14.75 ¿Cuál es la resistencia dieléctrica de un material dieléctrico? ¿Qué unidades se usan para la resistencia dieléctrica? ¿Qué es la ruptura dieléctrica?

14.76 ¿Cuál es el ángulo de pérdida dieléctrica y el factor de pérdida dieléctrica para un material dieléctrico? ¿Por qué resulta indeseable un factor de pérdida dieléctrica elevado?

14.77 Un capacitor de placas simple puede almacenar 7.0×10^{-5} C a un potencial de 12 000 V. Si un material dieléctrico de titanato de bario con $\kappa = 2\,100$ se usa entre las placas, las cuales tienen un área de $5.0 \times 10^{-5}\ m^2$, ¿cuál debe ser la distancia de separación entre las placas?

***14.78** Un capacitor de placas simple almacena 6.5×10^{-5} C a un potencial de 12 000 V. Si el área de las placas es de 3.0×10^{-5} m^2 y la distancia entre las mismas es de 0.18 mm, ¿cuál debe ser la constante dieléctrica del material entre las placas?

14.79 ¿Cuál es la composición aproximada de la porcelana eléctrica? ¿Cuál es la principal desventaja de la porcelana eléctrica como material aislante eléctrico?

14.80 ¿Cuál es la composición aproximada de la esteatita? ¿Qué propiedades eléctricas deseables tiene la esteatita como un material aislante?

14.81 ¿Cuál es la composición de la fosterita? ¿Por qué la fosterita es un excelente material aislador?

14.82 ¿Por qué la alúmina aglutinada se usa ampliamente como una sustancia para aplicaciones de dispositivos electrónicos?

14.83 ¿Por qué se usa el $BaTiO_3$ para capacitores de disco plano pequeños y de alto valor? ¿Por qué se varía la capacitancia de capacitores de $BaTiO_3$? ¿Cuáles son las cuatro etapas principales en la manufactura de un capacitor cerámico de disco plano?

14.84 ¿Qué es un termistor? ¿Qué es un termistor CTN?

14.85 ¿Qué materiales se usan para fabricar termistores de CTN?

14.86 ¿Cuál se cree que es el mecanismo de conducción eléctrica en el Fe_3O_4?

14.87 ¿Cómo se cambia la conductividad eléctrica de semiconductores de óxido metálico para termistores?

14.88 ¿Qué cambio ocurre en la celda unitaria de $BaTiO_3$ cuando ésta se enfría por debajo de 120°C? ¿Cómo se llama la temperatura de transformación?

14.89 ¿Qué son los dominios ferroeléctricos? ¿Cómo pueden alinearse en una dirección?

14.90 Describa el efecto piezoeléctrico para producir una respuesta eléctrica con la aplicación de presión sobre un material ferroeléctrico. Haga lo mismo con respecto a la producción de una respuesta mecánica mediante la aplicación de una fuerza eléctrica.

14.91 Describa varios dispositivos que utilizan el efecto piezoeléctrico.

14.92 ¿Qué son los materiales piezoeléctricos PZT? ¿De qué manera son superiores a los materiales piezoeléctricos de $BaTiO_3$?

14.13 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. Clasifique las siguientes soluciones sólidas de cobre en orden de conductividad descendente. Indique las razones de sus elecciones. *a*) Cu-1 % en peso de Zn, *b*) Cu-1 % en peso de Ga, y *c*) Cu-1 % en peso de Fe.

2. Considere el sistema de fase isomorfa Cu-Ni. Dibuje un diagrama aproximado que muestre la conductividad en función de la composición de la aleación.

3. Investigue las propiedades eléctricas del titanato de bario ($BaTiO_3$) e indique una aplicación de este material.

4. Investigue las propiedades eléctricas del titanato de circonato de plomo (PZT) e indique una aplicación de este material.

5. El carburo de silicio (SiC) es una cerámica con características semiconductoras similares a las del silicio (Si). Explique las ventajas de utilizar SiC sobre Si como material semiconductor.

6. Diseñe un semiconductor tipo n basado en Si que permita una conductividad constante de 25 $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ a temperatura ambiente.

7. Diseñe un semiconductor tipo p basado en Si que permita una conductividad constante de 25 $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ a temperatura ambiente.

8. Elija el material para un alambre conductor de 20 mm de diámetro que conduce una corriente de 20 A. La máxima disipación de potencia es 4 W/m. (Utilice la tabla 14.1 y considere el costo como un criterio de selección.)

9. *a*) ¿Qué son los polímeros conductores? *b*) ¿Cómo funcionan? *c*) Mencione una aplicación.

Fuentes:

1. Binnig, G., H. Rohrer, *et al*., en *Physical Review Letters,* v 50 pp. 120–24 (1983).

2. http://ufrphy.lbhp.jussieu.fr/nano/

5. http://www.molec.com/products_consumables.html#STM

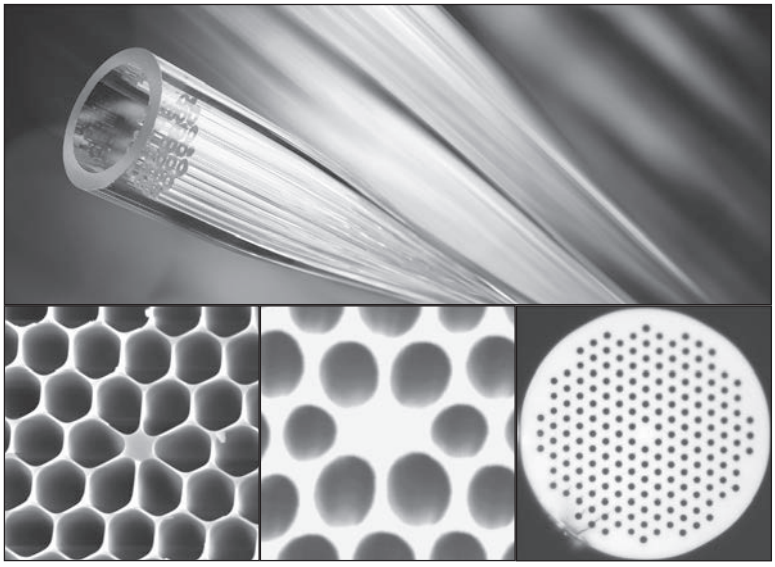
6. H. Dai, J. H. Hafner, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, R. E. Smalley, Nature 384, 147–150 (1996).

7. http://www.omicron.de/index2.html?/results/stm_image_of_chromium_decorated_steps_of_cu_111/~Omicron

8. http://www.almaden.ibm.com/almaden/media/image_mirage.html

CAPÍTULO 15

Propiedades ópticas y materiales superconductores



(*Cortesía de Crystal Fibre A/S*)

Una fibra de cristal fotónico es similar en estructura a un cristal normal, con la excepción de que el patrón repetido existe en una escala mucho mayor (intervalo de micrones) y sólo transversal a la longitud de la fibra. Ésta se fabrica apilando varios tubos de vidrio de sílice para formar un cilindro. El cilindro se estira después a temperaturas elevadas hasta obtener una fibra delgada con diámetros del orden de décimos de micrones. Después del proceso de manufactura, la fibra se asemejará a un panal. Debido a su estructura, la luz conducida a través de las fibras puede comportarse de maneras que no se entienden por completo. Por ejemplo, es posible permitir que luz de cierta frecuencia se propague a lo largo de la fibra mientras que otras frecuencias se bloquean. Tales características pueden utilizarse para fabricar dispositivos, como las fuentes luminosas sintonizables por longitud de onda e interruptores ópticos. La imagen de inicio del capítulo muestra la estructura de una fibra cristalina fotónica. Las preformas se muestran en la parte superior de la figura y las secciones transversales de fibras seleccionadas se ilustran en la parte inferior.[1] ■

[1] http://www.rikei.co.jp/dbdata/products/producte249.html

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Explicar qué fenómenos pueden ocurrir con la radiación luminosa cuando ésta pasa de un medio a otro.
2. Discutir por qué los materiales metálicos son opacos a la luz visible.
3. Explicar qué determina el color de los materiales metálicos.
4. Describir brevemente el fenómeno de la superconductividad.
5. Explicar por qué los materiales amorfos suelen ser transparentes.
6. Describir brevemente la construcción de un láser de rubí.
7. Describir el mecanismo de la absorción de fotones en un semiconductor que contiene defectos activos eléctricamente.
8. Explicar qué significa láser.
9. Describir de manera breve las ventajas de los superconductores de óxido a alta temperatura.
10. Citar diferencias entre opacidad, translucidez y transparencia.

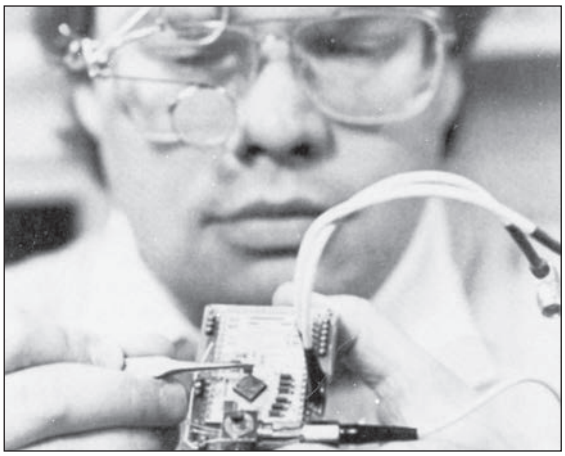
15.1 INTRODUCCIÓN

Las propiedades ópticas de materiales desempeñan un papel importante en gran parte de la alta tecnología de la actualidad (figura 15.1). En este capítulo se examinarán primero algunos de los fundamentos de la refracción, reflexión y absorción de luz en algunas clases de materiales. Luego se investigará cómo algunos materiales interactúan con la radiación luminosa para producir luminiscencia. Después se estudiará la emisión estimulada de radiación por medio de láseres. En la parte de fibras ópticas de este capítulo, se examinará cómo el desarrollo de las fibras ópticas de pérdida luminosa baja ha llevado al surgimiento de nuevos sistemas de comunicación por fibra óptica.

Por último, se considerarán los materiales superconductores que tienen una resistencia eléctrica cero debajo de sus valores críticos de temperatura, campos magnéticos y densidades de corriente. Hasta alrededor de 1987 la temperatura crítica más alta para un material superconductor fue aproximadamente de 25 K. En 1987 se hizo el descubrimiento extraordinario de que algunos materiales cerámicos podían hacerse superconductores por arriba de 100 K. Este descubrimiento puso en marcha un enorme esfuerzo de investigación mundial que ha creado altas expectativas para futuros desarrollos de ingeniería. En este capítulo se examinarán algunos aspectos de la estructura y propiedades de superconductores metálicos de tipos I y II, así como los nuevos de tipo cerámico.

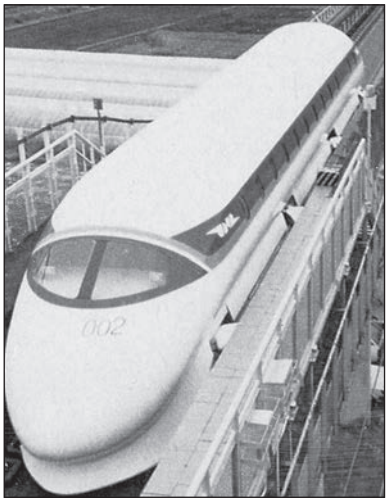
15.2 LA LUZ Y EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La luz visible es una forma de radiación electromagnética, con longitudes de onda que se extienden desde 0.40 a 0.75 μm (figura 15.2). La luz visible contiene bandas de colores que van del violeta hasta el rojo, como se muestra en la escala aumentada de la

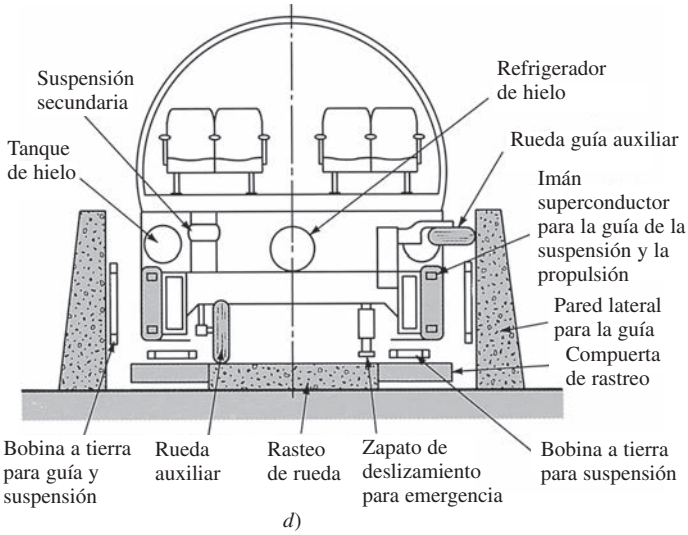


a)

b)



c)



d)

Figura 15.1
Nuevas tecnologías. *a*) Un ingeniero examina un transmisor láser que se usó en el segundo cable de guía luminosa trasatlántico, el cual entró en servicio en 1991. *b*) Examen de una preforma de vidrio de fibra óptica antes de extraerse en una fibra óptica del grueso de un cabello.
[a) y b) cortesía de AT&T.]
c) Tren del Japanese National Railways que utiliza imanes superconductores de Nb-Ti en crióstatos de helio líquido. El tren se diseñó para viajar de 400 a 500 km/h sobre un riel de prueba.
(Tomado de Mechanical Engineering, junio de 1988, p. 61.)
d) Sección transversal de un diseño de tren levitado avanzado (Japanese National Railway).
(Tomado de la "Encyclopedia of Materials Science and Engineering", MIT Press, 1986, p. 4766.)

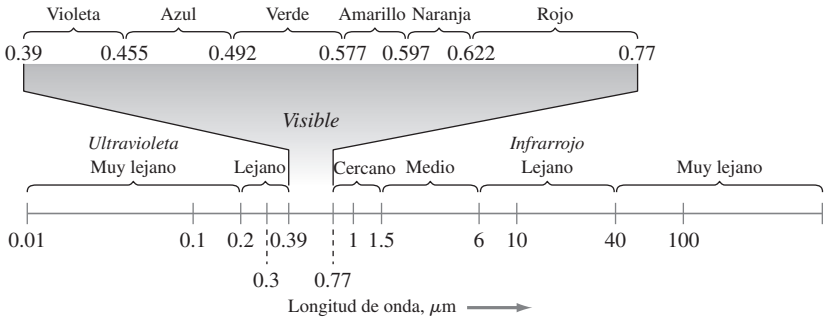


Figura 15.2
El espectro electromagnético desde la región ultravioleta hasta la infrarroja.

figura 15.2. La región ultravioleta cubre el intervalo desde casi 0.01 hasta alrededor de 0.40 μm, y la región infrarroja se extiende desde más o menos 0.75 hasta 1000 μm.

La verdadera naturaleza de la luz probablemente nunca se conozca. Sin embargo, se considera que la luz forma ondas y que está compuesta por partículas llamadas *fotones*. La energía ΔE, longitud de onda λ, y frecuencia v de los fotones se relacionan mediante la ecuación fundamental

$$\Delta E = hv = \frac{hc}{\lambda} \qquad \textbf{(15.1)}$$

donde h es la constante de Planck (6.62×10^{-34} J · s) y c es la velocidad de la luz en el vacío (3.00×10^{8} m/s). Estas ecuaciones permiten considerar al fotón como una partícula de energía E o como una onda con una longitud de onda y frecuencia específicas.

PROBLEMA DE EJEMPLO 15.1

Un fotón en un semiconductor de ZnS desciende desde un nivel de energía de impurezas a 1.38 eV debajo de su banda de conducción hasta su banda de valencia. ¿Cuál es la longitud de onda de la radiación producida por el fotón en la transición? Si es visible, ¿cuál es el color de la radiación? El ZnS tiene una brecha de energía de 3.54 eV.

■ Solución

La diferencia de energía para el fotón que desciende desde el nivel de 1.38 eV debajo de la banda de conducción hasta la banda de valencia es 3.54 eV − 1.38 eV = 2.16 eV.

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} \qquad \textbf{(15.1)}$$

donde $h = 6.62 \times 10^{-34}$ J · s
$c = 3.00 \times 10^{8}$ m/s
1 eV $= 1.60 \times 10^{-19}$ J

Por tanto,

$$\lambda = \frac{(6.62 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s})(3.00 \times 10^{8}\ \text{m/s})}{(2.16\ \text{eV})(1.60 \times 10^{-19}\ \text{JeV})(10^{-9}\ \text{m/nm})} = 574.7\ \text{nm} \blacktriangleleft$$

La longitud de onda de este fotón en 574.7 nm es la región amarilla visible del espectro electromagnético.

15.3 REFRACCIÓN DE LA LUZ

15.3.1 Índice de refracción

Cuando los fotones de luz se transmiten a través de un material transparente, pierden algo de energía, y como resultado, la velocidad de la luz se reduce y el haz luminoso cambia de dirección. En la figura 15.3 se muestra de manera esquemática cómo un haz de luz que entra desde el aire se retarda cuando llega a un medio más denso como el vidrio de una ventana común. De este modo, el ángulo de incidencia para el haz luminoso es mayor que el ángulo refractado en este caso.

La velocidad relativa de la luz que pasa a través de un medio se expresa mediante la propiedad óptica denominada **índice de refracción** n. El valor de n de un medio se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío, c, y la velocidad de la luz en el medio considerado, v:

$$\text{Índice de refracción } n = \frac{c\ (\text{velocidad de la luz en el vacío})}{v\ (\text{velocidad de la luz en un medio})} \qquad \textbf{(15.2)}$$

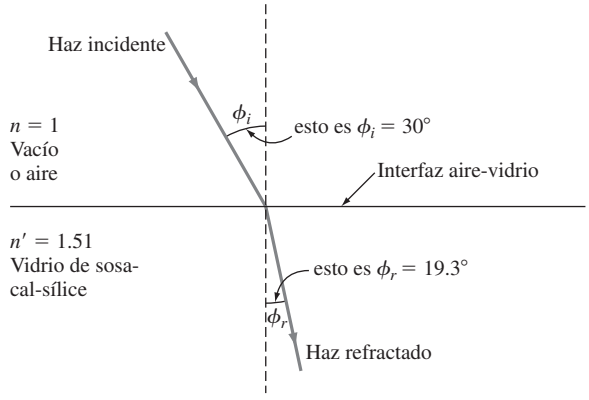


Figura 15.3
Refracción de un haz luminoso cuando éste se transmite desde el vacío (aire) a través de vidrio de sosa-cal-sílice.

Tabla 15.1 Índices de refracción de materiales seleccionados

Material	Índice de refracción promedio
Composiciones de vidrio:	
Vidrio de sílice	1.458
Vidrio de sosa-cal-sílice	1.51-1.52
Vidrio de borosilicato (Pyrex)	1.47
Cristal denso	1.6-1.7
Composiciones cristalinas	
Corindon, Al_2O_3	1.76
Cuarzo, SiO_2	1.555
Litargirio, PbO	2.61
Diamante, C	2.41
Plásticos ópticos:	
Polietileno	1.50-1.54
Poliestireno	1.59-1.60
Polimetilmetacrilato	1.48-1.50
Politetrafluoroetileno	1.30-1.40

En la tabla 15.1 se enlistan los índices de refracción promedio comunes de algunos vidrios y sólidos cristalinos. Estos valores varían desde cerca de 1.4 hasta 2.6, donde la mayoría de los vidrios de silicato tienen valores de 1.5 a 1.7. El diamante altamente refractivo ($n = 2.41$) permite que las joyas de diamantes de caras múltiples "relumbren" debido a las múltiples refracciones internas. El óxido de plomo (litargirio) con un valor de $n = 2.61$ se agrega a algunos vidrios de silicato para elevar sus índices refractivos de manera que sea posible utilizarlo con fines decorativos (véase la tabla 11.11). Debe notarse que los índices refractivos de materiales son una función de la longitud de onda y la frecuencia. Por ejemplo, el índice refractivo de vidrio ligero varía de 1.60 a 0.40 μm hasta 1.57 a 1.0 μm.

15.3.2 Ley de Snell de la refracción de la luz

Los índices refractivos de la luz que pasa de un medio de índice de refracción n a otro medio de índice de refracción n', se relacionan con el ángulo incidente ϕ y el ángulo de refracción ϕ' mediante la relación

$$\frac{n}{n'} = \frac{\operatorname{sen} \phi'}{\operatorname{sen} \phi} \qquad \text{(Ley de Snell)} \qquad \textbf{(15.3)}$$

Cuando la luz pasa de un medio con un alto índice de refracción a otro con índice de refracción bajo, existe un ángulo de incidencia crítico ϕ_c, el cual, si se incrementa, originará la reflexión total interna de la luz (figura 15.4). Este ángulo ϕ_c se define en ϕ' (refracción) = 90°.

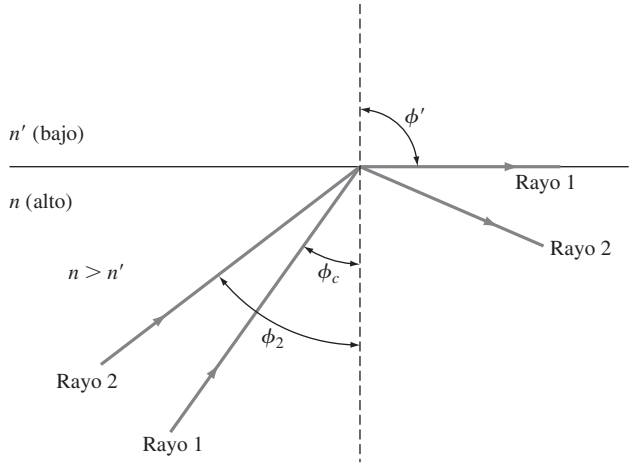


Figura 15.4
Diagrama que indica el ángulo crítico ϕ_c para la reflexión total interna de luz que pasa de un medio de índice refractivo alto n a otro de índice refractivo bajo n'. Adviértase que el rayo 2, el cual tiene un ángulo de incidencia ϕ_2 mayor que ϕ_c, se refleja totalmente de regreso hacia el medio de alto índice de refracción.

PROBLEMA DE EJEMPLO 15.2

¿Cuál es el ángulo crítico ϕ_c, para que la luz sea totalmente reflejada cuando sale de una placa plana de vidrio de sosa-cal-sílice ($n = 1.51$) y entra al aire ($n = 1$)?

■ Solución

Empleando la ley de Snell (ecuación 15.3)

$$\frac{n}{n'} = \frac{\operatorname{sen}\phi'}{\operatorname{sen}\phi_c}$$

$$\frac{1.51}{1} = \frac{\operatorname{sen} 90°}{\operatorname{sen}\phi_c}$$

donde n = índice de refracción del vidrio
n' = índice de refracción del aire
ϕ' = 90° para refracción total
ϕ_c = ángulo crítico para reflexión total (incógnita)

$$\operatorname{sen}\phi_c = \frac{1}{1.51}(\operatorname{sen} 90°) = 0.662$$

$$\phi_c = 41.5° \blacktriangleleft$$

Nota: En la sección 15.7 sobre fibras ópticas se verá que, al usar un revestimiento metálico de un vidrio de bajo índice de refracción que rodea a un núcleo de alto índice refractivo, una fibra óptica puede transmitir luz a largas distancias debido a que la luz se refleja internamente de manera continua.

15.4 ABSORCIÓN, TRANSMISIÓN Y REFLEXIÓN DE LA LUZ

Todo material *absorbe* luz hasta cierto grado debido a la interacción de fotones de luz con la estructura electrónica y de enlace de los átomos, iones o moléculas que conforman al material (**absorción**). La fracción de la luz transmitida por un material particular depende entonces de la cantidad de luz reflejada y absorbida por el mismo. Para una longitud de onda particular λ, la suma de las fracciones de la luz incidente entrante con la reflejada, *absorbida* y transmitida, es igual a 1:

$$(\text{fracción reflejada})_\lambda + (\text{fracción absorbida})_\lambda + (\text{fracción transmitida})_\lambda = 1 \quad \textbf{(15.4)}$$

A continuación se considerará cómo varían estas fracciones en algunos tipos de materiales.

15.4.1 Metales

Con excepción de secciones muy delgadas, los metales reflejan y/o absorben intensamente la radiación incidente desde longitudes de ondas largas (ondas de radio) hasta la mitad del intervalo ultravioleta. Puesto que la banda de conducción se traslapa con la banda de valencia en los metales, la radiación incidente eleva con facilidad los electrones hasta los niveles de energía más altos. Luego de descender hasta los niveles de energía inferiores, las energías de los fotones son bajas y sus longitudes de onda largas. Este tipo de acción produce haces luminosos intensamente reflejados desde una superficie lisa, como se observa en muchos metales como el oro y la plata. La cantidad de energía absorbida por los metales depende de la estructura electrónica de cada uno. Por ejemplo, con el cobre y el oro hay una mayor absorción de las longitudes de onda cortas del azul y el verde, y una mayor reflexión de las longitudes de onda amarilla, naranja y roja, y por ello las superficies lisas de estos metales muestran los colores reflejados. Otros metales como la plata y el aluminio reflejan de manera considerable todas las partes del espectro visible y muestran un color "plateado" blanco.

sen

15.4.2 Vidrios de silicato

Reflexión de la luz en una superficie de placa de vidrio La proporción de la luz incidente reflejada por una superficie de una placa de vidrio pulida es muy pequeña. Esta cantidad depende principalmente del índice de refracción n del vidrio y del ángulo de incidencia de la luz en el vidrio. Para incidencia de luz normal (esto es, $\phi_i = 90°$), la fracción de luz reflejada R (denominada la *reflectividad*) por una superficie puede determinarse con la relación

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1}\right)^2 \quad \textbf{(15.5)}$$

donde n es el índice de refracción del medio óptico reflejante. También es posible utilizar esta fórmula con buena aproximación para ángulos de luz incidentes hasta alrededor

de 20 grados. Mediante el empleo de la ecuación 15.5, un vidrio de silicato con $n = 1.46$ tiene un valor R calculado de 0.035 o una reflectividad porcentual de 3.5 por ciento (véase el problema de ejemplo 15.3).

PROBLEMA DE EJEMPLO 15.3

Calcule la reflectividad de luz incidente ordinaria en una superficie plana pulida de vidrio de silicato con un índice de refracción de 1.46.

■ Solución

Empleando la ecuación 15.5 y $n = 1.46$ para el vidrio,

$$\text{Reflectividad} = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 = \left(\frac{1.46-1.00}{1.46+1.00}\right)^2 = 0.035$$

$$\%\ \text{de reflectividad} = R(100\%) = 0.035 \times 100\% = 3.5\% \blacktriangleleft$$

Absorción de la luz en una placa de vidrio El vidrio absorbe energía de la luz que transmite de manera que la intensidad luminosa disminuye cuando se incrementa la trayectoria de la luz. La relación entre la fracción de luz que entra, I_0, y la fracción de luz que sale, I, de una lámina o placa de vidrio de espesor t que no tiene centros de dispersión, es

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha t} \tag{15.6}$$

La constante α en esta relación se denomina el *coeficiente de absorción lineal* y tiene las unidades de cm^{-1} si el espesor se mide en centímetros. Como se muestra en el problema de ejemplo 15.4, hay una pérdida de energía relativamente pequeña por absorción a través de una placa de vidrio de silicato.

PROBLEMA DE EJEMPLO 15.4

La luz ordinaria incide sobre una placa de vidrio pulido de 0.50 cm de espesor que tiene un índice de refracción de 1.50. ¿Qué fracción de luz absorbe el vidrio cuando ésta pasa entre las superficies de la placa ($\alpha = 0.03\ cm^{-1}$)?

■ Solución

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha t} \qquad I_0 = 1.00 \qquad \alpha = 0.03\ cm^{-1}$$

$$I = ? \qquad t = 0.50\ cm$$

$$\frac{I}{1.00} = e^{-(0.03\ cm^{-1})(0.50\ cm)}$$

$$I = (1.00)e^{-0.015} = 0.985$$

De este modo, la fracción de la luz que se pierde por absorción en el vidrio es: $1 - 0.985 = 0.015$, o 1.5 por ciento. ◄

Reflexión, absorción y transmitancia de luz en una placa de vidrio La cantidad de luz incidente que se transmite a través de una placa de vidrio se determina por medio

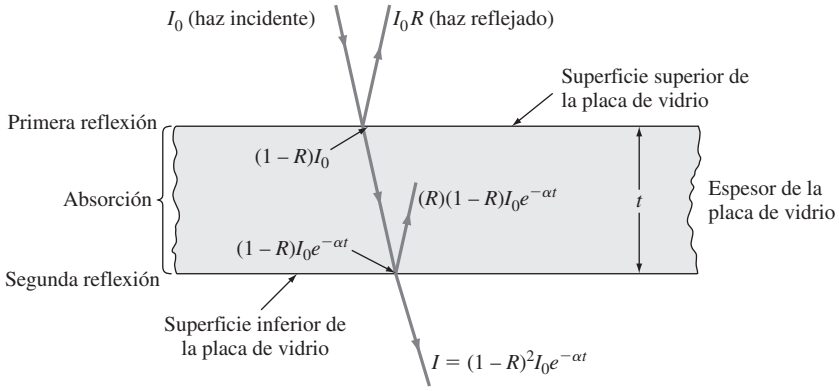


Figura 15.5
Transmitancia de luz a través de una placa de vidrio en la cual la reflectancia ocurre en la superficie superior e inferior y la absorción dentro de la placa.

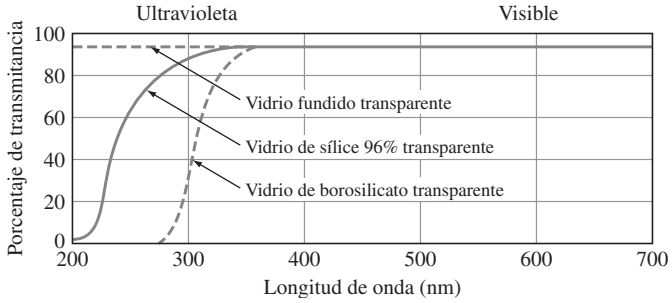


Figura 15.6
Transmitancia porcentual *versus* la longitud de onda de varios tipos de vidrios transparentes.

de la cantidad de luz reflejada en las superficies tanto superior como inferior, así como por la cantidad que se absorbe dentro de la placa. Se considerará la transmitancia de la luz a través de una placa de vidrio, como se ilustra en la figura 15.5. La fracción de la luz incidente que llega a la superficie inferior del vidrio es $(1 - R)(I_0e^{-\alpha t})$. La fracción de la luz incidente reflejada en la superficie inferior será entonces $(R)(1 - R)(I_0e^{-\alpha t})$. De este modo, la diferencia entre la luz que llega a la superficie inferior de la placa de vidrio y la que se refleja en la superficie inferior es la fracción de la luz transmitida I, que es:

$$\begin{aligned} I &= [(1 - R)(I_0e^{-\alpha t})] - [(R)(1 - R)(I_0e^{-\alpha t})] \\ &= (1 - R)(I_0e^{-\alpha t})(1 - R) = (1 - R)^2(I_0e^{-\alpha t}) \end{aligned} \qquad \textbf{(15.7)}$$

En la figura 15.6 se muestra que casi 90 por ciento de la luz incidente se transmite en vidrio de sílice si la longitud de onda de la luz incidente es mayor que 300 nm, aproximadamente. En el caso de luz ultravioleta de longitud de onda más corta, se produce mucho más absorción y la transmitancia disminuye de manera considerable.

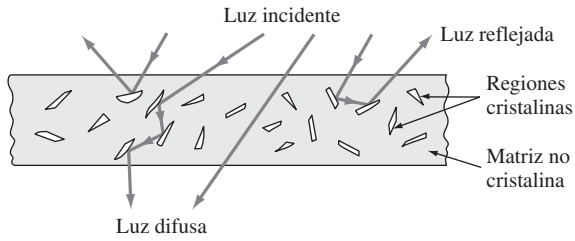


Figura 15.7
Las reflexiones internas múltiples en las interfaces de la región cristalina reducen la transparencia de termoplásticos parcialmente cristalinos.

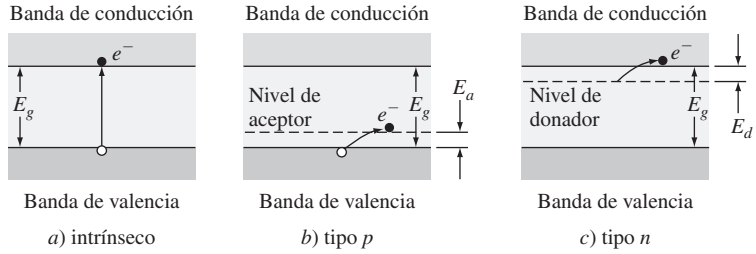


Figura 15.8
Absorción óptica de fotones en semiconductores. La absorción ocurre en *a*) Si $h\nu > E_g$, *b*) Si $h\nu > E_a$ y c) Si $h\nu > E_d$.

15.4.3 Plásticos

Muchos plásticos no cristalinos como el poliestireno, el polimetil metacrilato y el policarbonato, tienen excelente transparencia. Sin embargo, en algunos materiales plásticos hay regiones cristalinas que tienen índices de refracción superiores a los de su matriz no cristalina. Si estas regiones son de mayor tamaño que la longitud de onda de la luz incidente, las ondas luminosas se dispersarán por reflexión y refracción, y, en consecuencia, disminuye la transparencia del material (figura 15.7). Por ejemplo, el polietileno de lámina delgada, que tiene una estructura de cadena ramificada y por ello un bajo grado de cristalinidad, tiene mayor transparencia que el polietileno de cadena lineal más cristalino y de densidad más alta. Las transparencias de otros plásticos parcialmente cristalinos pueden variar de lo oscuro a lo opaco, dependiendo sobre todo de su grado de cristalinidad, contenido de impurezas y contenido de cargas.

15.4.4 Semiconductores

En los semiconductores los fotones de luz pueden absorberse de varias maneras (figura 15.8). En semiconductores intrínsecos (puros) como el Si, Ge y GaAs, los fotones pueden absorberse para crear pares electrón-hueco y causar que los electrones salten la brecha de bandas de energía desde la banda de valencia hasta la de conducción (figura

15.8*a*). Para que ocurra lo anterior, el fotón de luz entrante debe tener un valor de energía igual o mayor que el de la brecha de energía E_g. Si la energía del fotón es mayor que E_g, el exceso de energía se disipa como calor. En semiconductores que contienen impurezas de donador y aceptor, se absorben fotones de mucho menor energía (y, en consecuencia, mucho mayor longitud de onda) causando que los electrones salten desde la banda de valencia en niveles de aceptor (figura 15.8*b*) o desde niveles de donador a la banda de conducción (figura 15.8*c*). Por tanto, los semiconductores son opacos a fotones de luz de energía alta e intermedia (longitud de onda corta e intermedia) y transparentes a fotones de longitud de onda muy larga y baja energía.

PROBLEMA DE EJEMPLO 15.5

Calcule la longitud de onda mínima de fotones que absorbe silicio intrínseco a temperatura ambiente ($E_g = 1.10$ eV).

■ Solución

Para la absorción en este semiconductor, la longitud de onda mínima está dada por la ecuación 15.1:

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{(6.62 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s})(3.00 \times 10^{8}\ \text{m/s})}{(1.10\ \text{eV})(1.60 \times 10^{-19}\ \text{J/eV})}$$
$$= 1.13 \times 10^{-6}\ \text{m o } 1.13\ \mu\text{m} \blacktriangleleft$$

De este modo, para la absorción los fotones deben tener una longitud de onda al menos tan corta como 1.13 μm de manera que los electrones puedan excitarse a través de la brecha de banda de 1.10 eV.

15.5 LUMINISCENCIA

La **luminiscencia** puede definirse como el proceso mediante el cual una sustancia absorbe energía y luego emite espontáneamente radiación visible o cercana a la visible. En este proceso la energía de entrada excita los electrones de un material luminiscente desde la banda de valencia hasta la banda de conducción. Es posible que la fuente de la energía de entrada sean, por ejemplo, electrones de alta energía o fotones de luz. Los electrones excitados durante la luminiscencia caen a niveles de energía inferiores. En algunos casos quizá se recombinen con huecos. Si la emisión ocurre dentro de 10^{-8} s después de la excitación, la luminiscencia se denomina **fluorescencia**, y si la emisión sucede después de 10^{-8} s, recibe el nombre de **fosforescencia**.

La luminiscencia la producen materiales llamados *fósforos*, que pueden absorber radiación de onda corta y alta energía y emitir de manera espontánea radiación luminosa de longitud de onda más larga y energía inferior. Los espectros de emisión de materiales luminiscentes se controlan industrialmente agregando impurezas llamadas *activadores*. Los activadores proporcionan niveles de energía discretos en la brecha de energía entre las bandas de conducción y valencia del material huésped (figura 15.9). Un mecanismo postulado para el proceso fosforescente es que los electrones excitados se atrapan de diversas maneras a niveles de energía altos y deben salir de las trampas antes de que puedan descender a niveles de energía inferiores y emitir luz de una banda espectral característica. El proceso de trampas se utiliza para explicar el retardo en la emisión de luz de fósforos excitados.

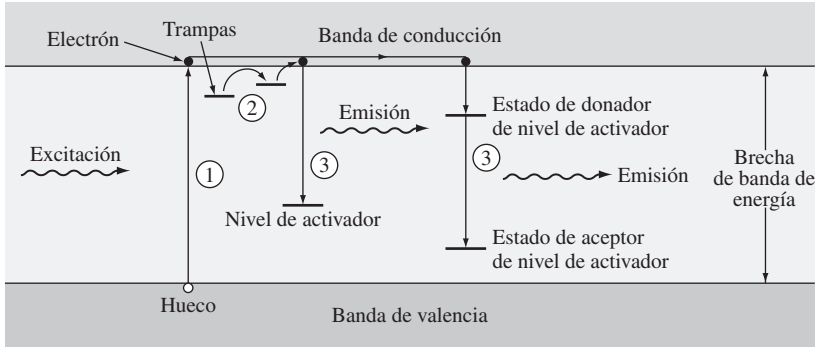


Figura 15.9
Cambios de energía durante la luminiscencia. 1) Se crean pares electrón-hueco excitando electrones a la banda de conducción o a trampas. 2) Los electrones pueden excitarse térmicamente de una trampa a otra o hacia la banda de conducción. 3) Los electrones pueden descender hasta niveles de activador (donador) superiores y luego subsecuentemente a niveles de aceptor inferiores, emitiendo luz visible.

Los procesos de luminiscencia se clasifican de acuerdo con la fuente de energía para la excitación electrónica. Dos tipos industrialmente importantes son la *fotoluminiscencia* y la *catodoluminiscencia*.

15.5.1 Fotoluminiscencia

En la lámpara fluorescente común, la fotoluminiscencia convierte la radiación ultravioleta de un arco de mercurio de baja presión en luz visible utilizando un halofosfato de fósforo. El halofosfato de calcio de composición aproximada $Ca_{10}F_2P_6O_{24}$ con cerca de 20 por ciento de los iones F^- reemplazados por iones Cl^- se usa como el material de fósforo huésped en la mayoría de las lámparas. Los iones de antimonio (Sb^{3+}) proporcionan una emisión azul y los iones de manganeso (Mn^{2+}) una banda de emisión naranja-roja. Variando los Mn^{2+}, es posible obtener varias tonalidades de luz azul, naranja y blanca. La luz ultravioleta de alta energía de los átomos de mercurio excitados ocasiona que la pared interior recubierta de fósforo del tubo de la lámpara fluorescente, emita luz visible de longitud de onda más larga y energía menor (figura 15.10).

15.5.2 Catodoluminiscencia

Este tipo de luminiscencia se produce mediante un cátodo energizado que genera un haz de electrones de alta energía. Las aplicaciones de este proceso incluyen las luminiscencias del microscopio electrónico, el osciloscopio de rayos catódicos y la pantalla de televisores a color. La fosforescencia de esta última es especialmente interesante. El moderno aparato televisor tiene rayas verticales muy estrechas (de aproximadamente 0.25 mm de ancho) de fósforos que emiten luz roja, verde y azul que se depositan sobre la superficie interior de la placa de la cara del tubo de imagen del televisor (figura 15.11). A través de una máscara de sombra de acero con pequeños huecos elongados

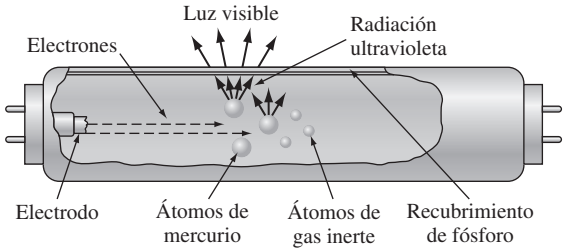


Figura 15.10
Diagrama de corte de una lámpara fluorescente que muestra la generación de electrones en un electrodo y la excitación de átomos de mercurio para proporcionar la luz UV que excita el recubrimiento de fósforo en el interior del tubo de una lámpara. El recubrimiento de fósforo excitado proporciona después luz visible mediante luminiscencia.

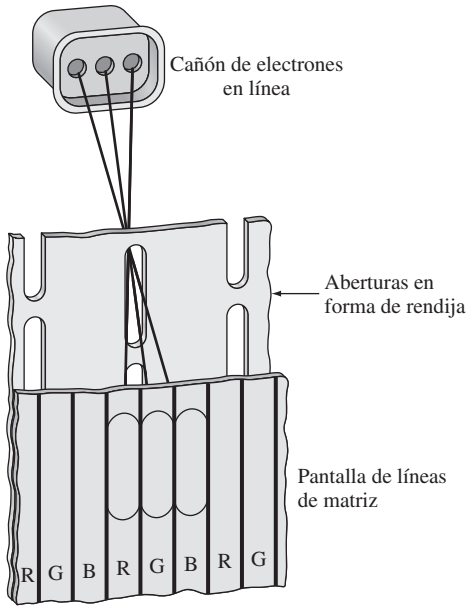


Figura 15.11
Diagrama que muestra el arreglo de las rayas verticales R(rojo), G(verde) y B(azul) de fósforos de una pantalla de un televisor a color. También se muestran varias de las aberturas elongadas de la máscara de sombra de acero.
(Cortesía de RCA.)

(de más o menos 0.15 mm de ancho) la señal entrante del televisor se escanea sobre la pantalla completa 30 veces por segundo. El pequeño tamaño y el gran número de áreas de fósforos se exponen de manera consecutiva en el escaneo rápido de 15 750 líneas horizontales por segundo y la persistencia de una imagen en el sistema visual humano hace posible una imagen visible clara con buena resolución. Los fósforos que se usan comúnmente para los colores son sulfuro de zinc (ZnS) con un aceptor de Ag^+ y un donador de Cl^- para el color azul (Zn,Cd)S con un aceptor de Cu^+ y un donador de Al^{3+} para el color verde, y oxisulfuro de itrio (Y_2O_2S) con 3% de europio (Eu) para el color rojo. Los materiales de los fósforos deben retener cierto brillo de imagen hasta el siguiente escaneo, aunque no debe ser demasiado para no distorsionar la imagen.

La intensidad de la luminiscencia, I, está dada por

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\frac{t}{\tau} \tag{15.8}$$

donde I_0 = intensidad inicial de la luminiscencia, e I = fracción de la luminiscencia después del tiempo t. La cantidad τ es la constante del tiempo de relajación del material.

PROBLEMA DE EJEMPLO 15.6

Un fósforo de un televisor a color tiene un tiempo de relajación de 3.9×10^{-3} s. ¿Cuánto tiempo será necesario para que la intensidad de este material de fósforo disminuya hasta 10 por ciento de su intensidad original?

■ Solución

Utilizando la ecuación 15.8, $\ln(I/I_0) = -t/\tau$, o

$$\ln \frac{1}{10} = -\frac{t}{3.9 \times 10^{-3}\ \text{s}}$$

$$t = (-2.3)(-3.9 \times 10^{-3}\ \text{s}) = 9.0 \times 10^{-3}\ \text{s} \blacktriangleleft$$

15.6 RADIACIÓN DE EMISIÓN ESTIMULADA Y LÁSER

La luz emitida por fuentes de luz convencionales tales como las lámparas fluorescentes, proviene de las transiciones de electrones excitados a niveles de energía inferiores. Átomos de los mismos elementos en estas fuentes luminosas emiten fotones de longitudes de onda similares de manera independiente y aleatoria. En consecuencia, la radiación se emite en direcciones aleatorias y los trenes de onda están fuera de fase entre sí. Este tipo de radiación se dice que es *incoherente*. En contraste, una fuente luminosa llamada **láser** produce un **haz** de radiación cuyas emisiones de fotones están en fase, o son *coherentes*, y son paralelas, direccionales y monocromáticas (o casi). La palabra "láser" es un acrónimo cuyas letras significan "*l*ight *a*mplification by *s*timulated *e*mission of *r*adiation" (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación). En los láser algunos fotones emitidos "activos" estimulan a muchos otros de la misma frecuencia y longitud de onda para emitirse en fase como un haz de luz intenso y coherente (figura 15.12).

Para comprender el mecanismo implicado en la acción del láser, se considerará la operación de un láser de rubí de estado sólido. El láser de rubí que se muestra de manera esquemática en la figura 15.13, es un cristal de óxido de aluminio (Al_2O_3) que contiene cerca de 0.05 por ciento de iones de cromo^{3+}. Los iones Cr^{3+} ocupan sitios de la retícula sustitucional en la estructura de cristal de Al_2O_3 y son responsables del color rosa de la barra del láser. Estos iones actúan como centros fluorescentes que, cuando se excitan, descienden a niveles de energía inferiores, causando la emisión de

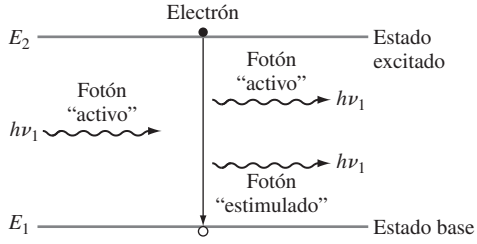


Figura 15.12
Diagrama esquemático que ilustra la emisión de un fotón "estimulado" por un fotón "activo" de la misma frecuencia y longitud de onda.

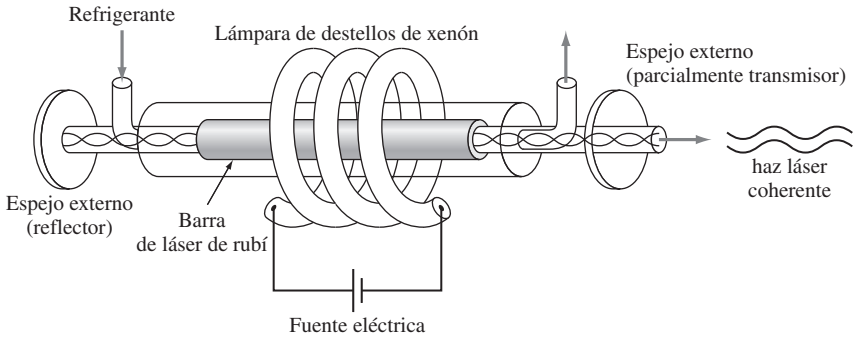


Figura 15.13
Diagrama esquemático de un láser de rubí pulsado.

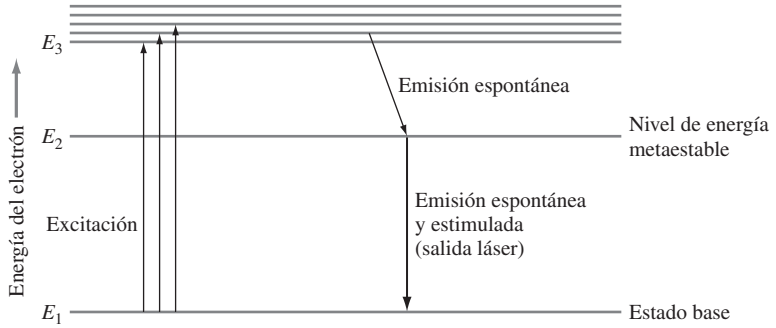


Figura 15.14
Diagrama simplificado de niveles de energía para un sistema de operación láser de tres niveles.

fotones a longitudes de onda específicas. Los extremos del cristal de la barra de rubí están conectados a tierra en paralelo para la emisión óptica. Un espejo totalmente reflector se coloca paralelo y cerca del extremo posterior de la barra de cristal, y otro parcialmente transmisor en el extremo frontal del láser, lo cual permite que el haz láser coherente pase a través de él.

La entrada de alta intensidad de una lámpara de destellos de xenón puede proporcionar la energía necesaria para excitar a los electrones del ion Cr^{3+} desde el estado base hasta niveles de energía elevados, como se indica por medio del nivel de la banda E_3 de la figura 15.14. Este efecto en la terminología láser se conoce como *bombeo* del láser. Los electrones excitados de los iones Cr^{3+} pueden descender de regreso al estado base o al nivel de energía metaestable E_2 de la figura 15.14. Sin embargo, antes de que pueda ocurrir la emisión estimulada de fotones en el láser, deben bombearse más electrones hasta el nivel metaestable de alta energía de no equilibrio E_2 que los que existen en el estado base (E_1). Esta condición del láser se conoce como **inversión de población** de los estados de energía de los electrones, como se indica de manera esquemática en la figura 15.15*b*; compare esta condición con la del nivel de energía de equilibrio de la figura 15.15*a*.

Los iones Cr^{3+} excitados pueden permanecer en el estado metaestable por varios milisegundos antes de que ocurra la emisión espontánea por electrones que descienden

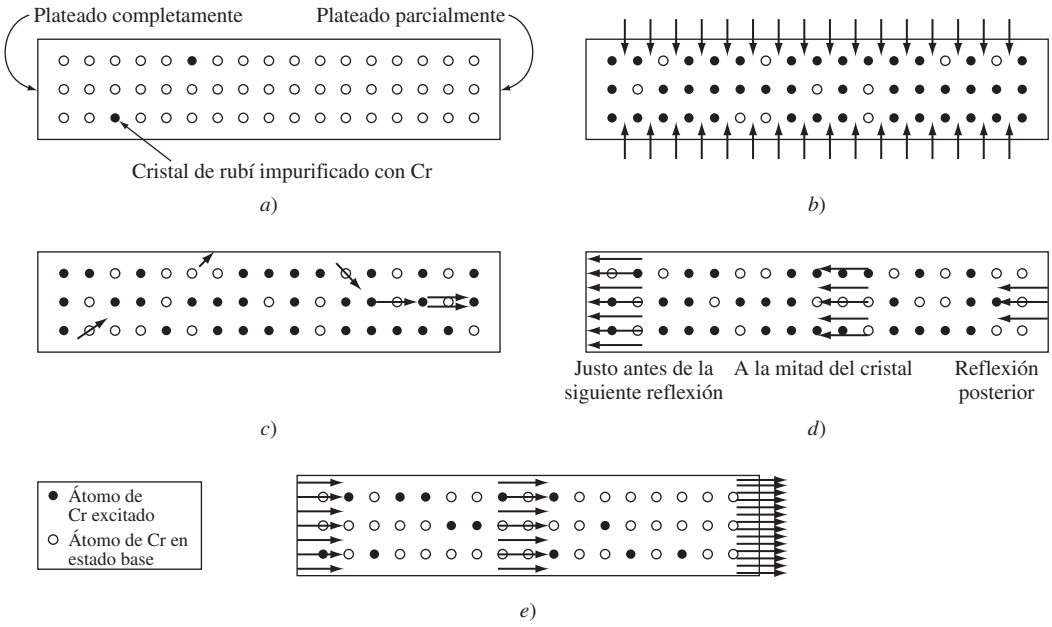


Figura 15.15
Diagrama esquemático de las etapas en el funcionamiento de un láser de rubí pulsado. *a*) En equilibrio. *b*) Excitación mediante una lámpara de destellos de xenón. *c*) Unos cuantos fotones emitidos espontáneamente inician la emisión estimulada de fotones. *d*) Reflejados hacia atrás, los fotones continúan estimulando la emisión de más fotones. *e*) El haz láser finalmente se emite.
(Tomado de R. M. Rose et al., vol. IV, "Structure and Properties of Materials", vol., IV, Wiley, 1965.)

de regreso al estado base. Los primeros pocos fotones producidos por el descenso de electrones desde el nivel E_2 metaestable de la figura 15.14 hasta el nivel base E_1, establecen una reacción en cadena de emisión estimulada, lo que provoca que muchos de los electrones efectúen el mismo salto de E_2 a E_1. Esta acción produce un gran número de fotones que están en fase y se mueven en una dirección paralela (figura 15.15*c*). Algunos de los fotones que saltan de E_2 a E_1 se pierden hacia el exterior de la barra, pero muchos se reflejan de un lado a otro a lo largo de la barra de rubí en los espejos de los extremos. Éstos causan que más y más electrones salten de E_2 y E_1, lo que ayuda a construir un haz de radiación coherente más intenso (figura 15.15*d*). Por último, cuando se forma un haz coherente bastante intenso dentro de la barra, el haz se transmite como un pulso de energía de alta intensidad ($\approx$ 0.6 ms) a través del espejo parcialmente transmisor en el extremo frontal del láser (figuras 15.15*e* y 15.13). El haz de láser producido por una barra de cristal de óxido de aluminio impurificado (rubí) de Cr^{3+} tiene una longitud de onda de 694.3 nm, que es una línea roja visible. Este tipo de láser, que sólo puede operarse de manera intermitente en ráfagas, se dice que es de tipo *pulsado*. En contraste, la mayoría de los láseres se operan con un haz continuo y reciben el nombre de láser *de onda continua* (OC).

15.6.1 Tipos de láser

Hay muchos tipos de láser de gas, líquido y sólido utilizados en la tecnología moderna. Se describirán brevemente algunos aspectos importantes de varios de éstos.

Tabla 15.2 Aplicaciones seleccionadas de láser en el procesamiento de materiales

Aplicaciones	Tipos de láser	Comentarios
1. Soldadura	YAG*	Láser de alta potencia promedio para penetración profunda y soldadura de gran tamaño
2. Perforación	YAG CO_2OC†	Densidades de alta potencia pico para perforar huecos de precisión con una zona mínima afectada por el calor, ahusamiento bajo y profundidades máximas
3. Corte	YAG CO_2OC	Corte de precisión de formas bi y tridimensionales complejas a altas velocidades en metales, plásticos y cerámicas
4. Tratamiento de superficies	$CWCO_2$	Transformación endurecedora de superficies de acero endureciéndolas arriba de temperaturas austeníticas con un haz desenfocado y exploratorio, y permitiendo que el metal se autotemple
5. Grabado	YAG CO_2OC	Grabado de grandes áreas de cerámicas tratadas térmicamente y obleas de silicio para proporcionar sustratos de circuito individuales
6. Fotolitografía	Excimidor	Procesamiento fotolitográfico de excimidor de línea estrecha y estabilizado espectralmente en la fabricación de semiconductores.

*YAG = itrio-aluminio-granate es un huésped cristalino que se utiliza en los láser de niodimio de estado sólido.
†CO_2OC = láser de dióxido de carbón de onda continua (en oposición a pulsada).

Láser de rubí La estructura y funcionamiento del láser de rubí ya se describió. Este láser no se usa mucho en la actualidad por las dificultades que existen en el crecimiento de las barras de cristal en comparación con la facilidad de construir láser de neodimio.

Láser de neodimio-YAG El láser de neodimio-itrio-aluminio-granate (Nd:YAG) se construye combinando una parte por cien de átomos de Nd en un cristal huésped de YAG. Este láser emite en el cercano infrarrojo a una longitud de onda de 1.06 μm con potencia continua hasta de casi 250 W y con potencia pulsada tan alta como varios megawatts. El material huésped YAG tiene como ventaja una alta conductividad térmica para eliminar el calor de exceso. En el procesamiento de materiales, el láser de Nd:YAG se usa para soldadura, perforación, grabado y corte (tabla 15.2).

Láser de dióxido de carbono CO_2 Los láser de dióxido de carbono son algunos de los más poderosos. Operan principalmente en el infrarrojo medio a 10.6 μm. Varían desde unos cuantos miliwatts de potencia continua hasta grandes pulsos con valores tan altos como 10 000 J de energía. Operan por medio de las colisiones de electrones que excitan a moléculas de nitrógeno hasta niveles de energía metaestables que después transfieren su energía para excitar a las moléculas de CO_2, las cuales a su vez emiten radiación láser al descender a niveles de energía inferiores. Los láser de dióxido de carbono se usan en aplicaciones de procesamiento de metales tales como corte, soldadura y en el tratamiento térmico localizado de aceros (tabla 15.2).

Láser semiconductores Los láser semiconductores, o de diodo, por lo común casi del tamaño de un grano de sal, son los más pequeños que se fabrican. Consisten en una unión pn elaborada con un semiconductor compuesto tal como GaAs, que tiene una brecha de banda suficientemente grande para la acción del láser (figura 15.16). En un principio, el láser de diodo de GaAs se fabricó como un láser de homounión con una sola unión pn (figura 15.16*a*). La cavidad resonante del láser se crea hendiendo el cristal para formar las dos facetas extremas. La interfaz cristal-aire produce las reflexiones necesarias para la acción del láser debido a la diferencia en los índices de refracción del aire y el GaAs. El láser de diodo alcanza la inver-

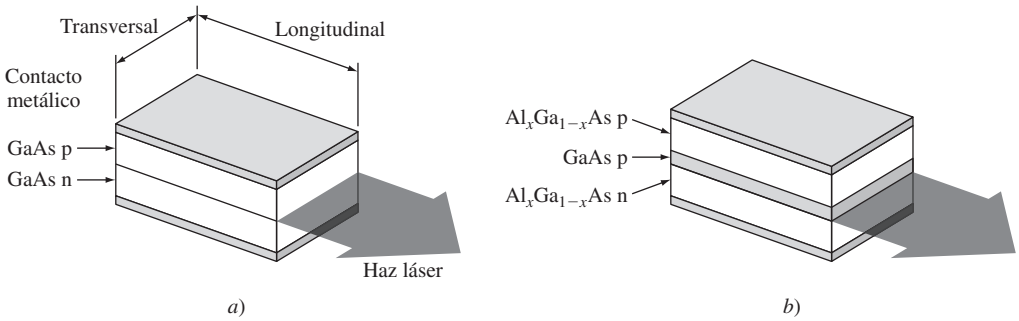


Figura 15.16
a) Láser de GaAs de homounión simple. *b*) Láser de GaAs de heterounión doble. Las capas de $Al_xGa_{1-x}(As)$ de tipo n tienen brechas de banda más anchas e índices de refracción inferiores y confinan a los electrones y huecos dentro de la capa activa de GaAs tipo p.

sión de población mediante una intensa polarización directa de una unión pn altamente impurificada. Se genera un gran número de pares electrón-hueco, y muchos de éstos se recombinan a su vez para emitir fotones de luz.

Con el láser de *heterounión doble* (HD) se consiguió una mejor eficiencia (figura 15.16*b*). En un láser HD de GaAs, una capa delgada de GaAs p entre capas $Al_{x-}Ga_{1-x}As$ p y n confina a los electrones y huecos dentro de la capa activa GaAs p. Las capas de AlGaAs tienen brechas de banda más anchas y menores índices de refracción y por ello restringen el movimiento de la luz del láser a una guía de onda miniatura. Actualmente, la aplicación más difundida de los láser de diodo GaAs se hace para los discos compactos.

15.7 FIBRAS ÓPTICAS

Las fibras ópticas delgadas como un cabello ($\approx 1.25\ \mu$m de diámetro) que se elaboran principalmente de vidrio de sílice (SiO_2), se utilizan en modernos sistemas de **comunicación por fibras ópticas**. Estos sistemas consisten esencialmente en un transmisor (esto es, un láser semiconductor) para codificar las señales eléctricas en señales luminosas, una fibra óptica para transmitir las señales de luz y un fotodiodo para convertir estas últimas de nuevo en señales eléctricas (figura 15.17).

15.7.1 Pérdidas de luz en fibras ópticas

Las fibras ópticas que se usan en sistemas de comunicación deben tener una pérdida de luz (atenuación) extremadamente baja, de manera que la señal luminosa codificada entrante pueda transmitirse a una distancia larga (esto es, 40 km [25 mi]) y seguir detectándose de manera satisfactoria. Fibras ópticas de vidrio de pérdidas de luz extremadamente bajas, las impurezas (en particular iones Fe^{2+}) en el vidrio de SiO_2) deben ser muy bajas. La pérdida de luz (**atenuación**) de una fibra óptica de vidrio suele medirse en *decibeles por kilómetro* (dB/km). La pérdida de luz en un material transmisor de luz en dB/km para transmisión de luz en una longitud l, está relacionada con la intensidad de luz entrante I_0 y la intensidad de luz saliente I mediante

$$-\text{pérdida}\,(\text{dB/km}) = \frac{10}{l\,(\text{km})}\log\frac{I}{I_0} \qquad \textbf{(15.9)}$$

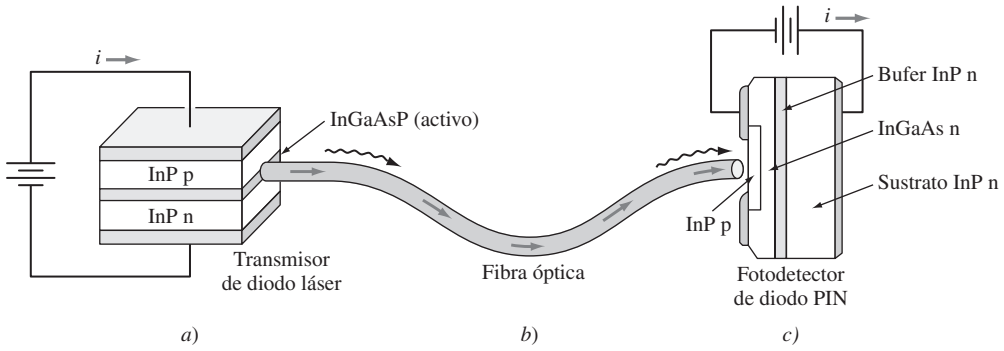


Figura 15.17
Elementos básicos de un sistema de comunicaciones por fibra óptica. *a*) Transmisor láser de InGaAsP. *b*) Fibra óptica para transmitir fotones. *c*) Fotodetector de diodo PIN.

PROBLEMA DE EJEMPLO 15.7

Una fibra de vidrio de sílice de bajas pérdidas para transmisión óptica, tiene una atenuación luminosa de 0.20 dB/km. *a*) ¿Cuál es la fracción de luz remanente después de que ha recorrido un km de esta fibra de vidrio? *b*) ¿Cuál es la fracción de luz remanente después de una transmisión de 40 km?

■ **Solución**

$$\text{Atenuación (dB/km)} = \frac{10}{l\,(\text{km})} \log \frac{I}{I_0} \qquad \textbf{(15.9)}$$

donde I_0 = intensidad luminosa en la fuente
I = intensidad luminosa en el detector

a) $-0.20\ \text{dB/km} = \dfrac{10}{1\ \text{km}} \log \dfrac{I}{I_0}$ o $\log \dfrac{I}{I_0} = -0.02$ o $\dfrac{I}{I_0} = 0.95$ ◀

b) $-0.20\ \text{dB/km} = \dfrac{10}{40\ \text{km}} \log \dfrac{I}{I_0}$ o $\log \dfrac{I}{I_0} = -0.80$ o $\dfrac{I}{I_0} = 0.16$ ◀

Nota: En la actualidad, las fibras ópticas unimodo pueden transmitir datos de luz de comunicaciones a casi 40 km sin tener que repetir la señal.

15.7.2 Fibras ópticas unimodo y multimodo

Las fibras ópticas para transmisión de luz sirven como **guías de onda ópticas** para dar señales luminosas en las comunicaciones ópticas. La retención de la luz dentro de la fibra óptica es posible haciendo que la luz atraviese el vidrio del núcleo central, el cual tiene un índice de refracción mayor que el vidrio del forro exterior (figura 15.18). En el tipo unimodo, el cual tiene un diámetro del núcleo de casi 8 μm y un diámetro del forro exterior de aproximadamente 125 μm, sólo hay una trayectoria aceptable del rayo luminoso guiado (figura 15.18*a*). En la fibra de vidrio óptica tipo multimodo, la cual tiene un núcleo de índice de refracción graduado, muchos modos de onda pasan simultáneamente a través de la fibra, lo que causa una señal existente más dispersa que la producida por la fibra unimodo (figura 15.18*b*). La mayoría de los nuevos sistemas

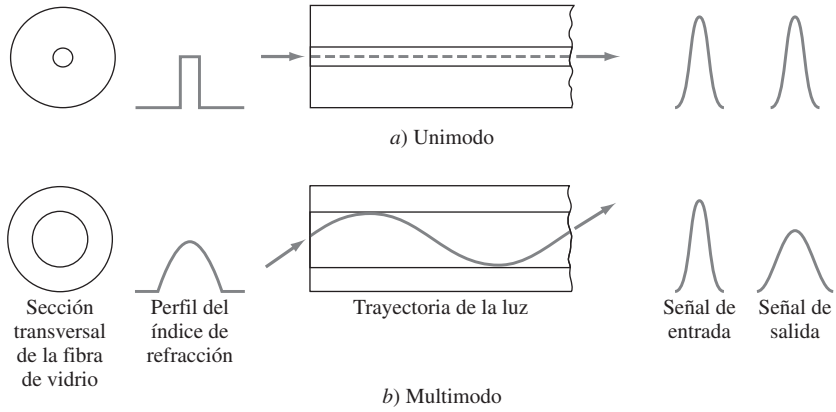


Figura 15.18
Comparación de fibras ópticas *a*) unimodo y *b*) multimodo por medio de la sección transversal en función del índice de refracción, la trayectoria de la luz, la entrada y salida de la señal. La señal de salida más aguda de la fibra unimodo se prefiere en los sistemas de comunicación ópticos de larga distancia.

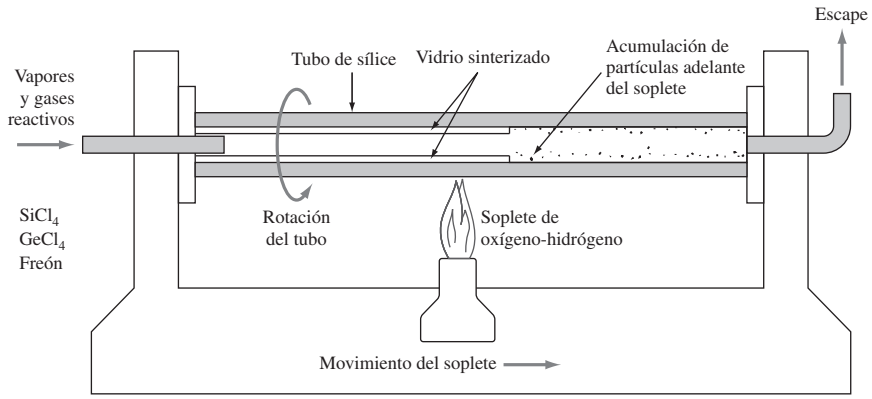


Figura 15.19
Diagrama esquemático del proceso de depósito químico de vapor modificado para la producción de preformas de vidrio en la elaboración de fibras de vidrio ópticas.
[Tomado de AT&T Tech. J. **66:***33(1987).]*

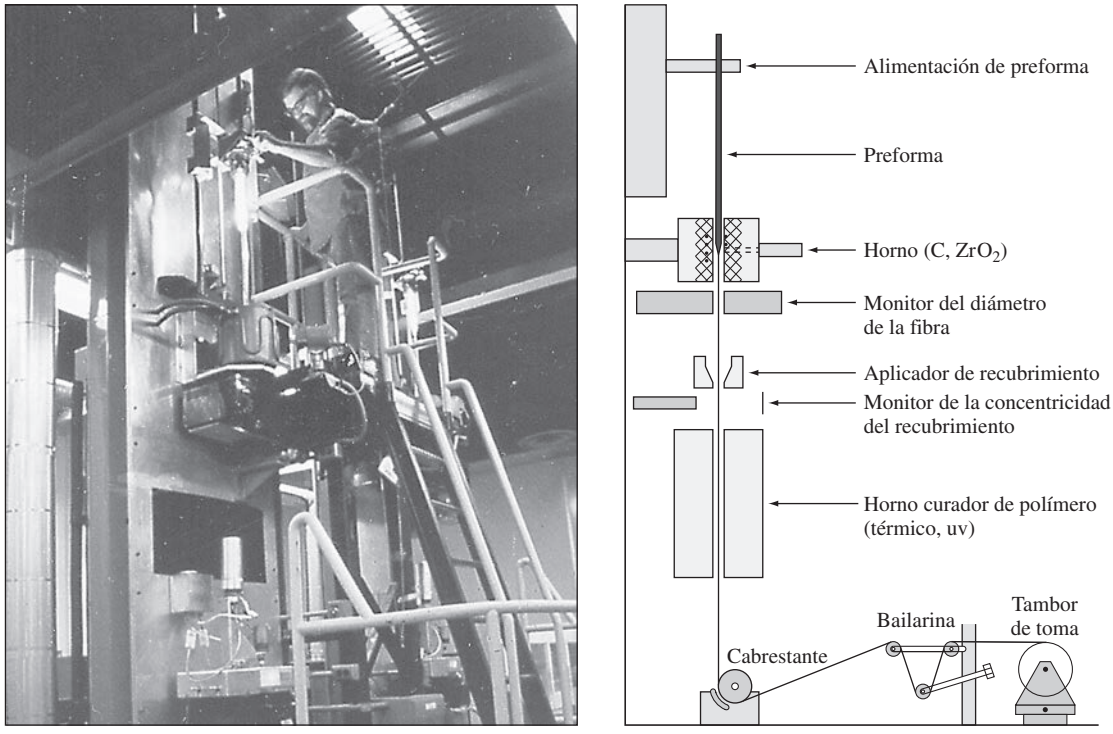
de comunicación por fibra óptica usan las fibras unimodo porque éstas tienen pérdidas luminosas inferiores y son más baratas y fáciles de fabricar.

15.7.3 Fabricación de fibras ópticas

Uno de los métodos más importantes para producir fibras de vidrio ópticas para sistemas de comunicación, es el proceso de *depósito químico modificado en fase vapor* (DQMV) (figura 15.19). En este proceso, vapor seco de alta pureza de $SiCl_4$ con diversas cantidades de $GeCl_4$ y vapor de hidrocarburos fluorinados, pasan a través de un tubo de silicio puro en rotación junto con oxígeno puro. Un soplete de oxihidrógeno

externo se mueve a lo largo del diámetro exterior del tubo rotatorio, permitiendo que el contenido reaccione para formar partículas de vidrio de sílice impurificadas con las combinaciones adecuadas de germanio y fluorita. El GeO_2 aumenta el índice de refracción del SiO_2, y la fluorita lo reduce. Por abajo de la región de la reacción, las partículas de vidrio emigran hacia la pared del tubo, donde se depositan. Después, el soplete móvil que causa la reacción para formar las partículas de vidrio, se pasa por encima y las sinteriza en una delgada capa de vidrio impurificado. El espesor de la capa impurificada depende del número de capas que se depositan mediante pasos repetidos del soplete. En cada paso la composición de los vapores se ajusta para producir el perfil de composición deseado, de manera que la fibra de vidrio producida subsecuentemente tendrá el perfil del índice de refracción que se desea.

En el siguiente paso, el tubo de sílice se calienta hasta una temperatura bastante alta de manera que el vidrio se aproxima a su punto de ablandamiento. La tensión de la superficie del vidrio causa que el tubo con las capas de vidrio depositadas se colapse de manera uniforme en una barra sólida que se conoce como *preforma* (figura 15.1*b*). La preforma de vidrio del proceso de DQMV se inserta después en un horno de alta temperatura, y una fibra de vidrio de aproximadamente 125 μm de diámetro se extrae de él (figura 15.20). En un proceso en línea se aplica un recubrimiento polimérico



a) *b*)

Figura 15.20
Arreglo para extraer fibra de vidrio óptica de una preforma de vidrio. *a*) Fabricación real. *(Cortesía de AT&T.)*
b) Arreglo esquemático.
(Tomado de la "Encyclopedia of Materials Science and Engineering," MIT Press, 1986, p. 1992.)

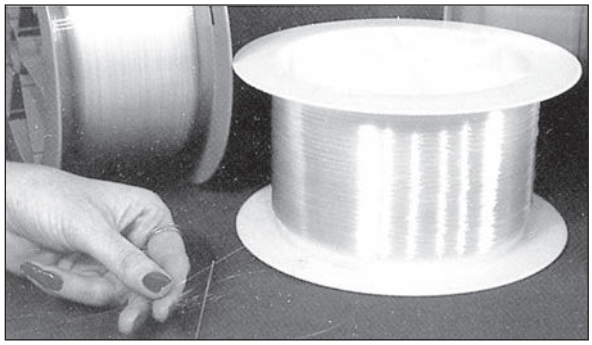


Figura 15.21
Carrete de fibra óptica.
(Cortesía de AT&T.)

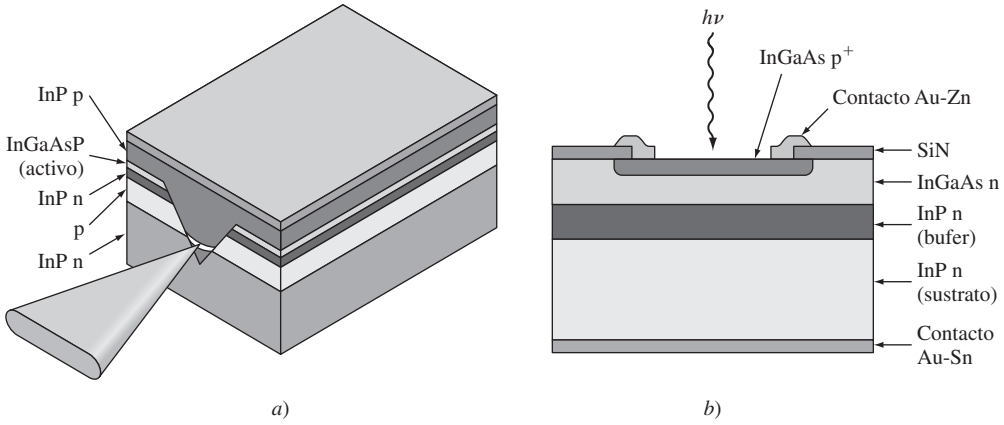


Figura 15.22
a) Diodo láser de InGaAsP de heteroestructura sobre un sustrato químico utilizado en sistemas de comunicación por fibra óptica de larga distancia. Adviértase el enfoque del haz láser mediante el canal V.
b) Fotodetector PIN para sistemas de comunicación ópticos.
[Tomado de AT&T Tech. J. 66(1987).]

de 60 μm de espesor para proteger la superficie de la fibra de vidrio contra daños. En la figura 15.21 se muestran carretes de fibras de vidrio terminadas. Son esenciales tolerancias muy pequeñas para el núcleo y el diámetro exterior de la fibra, de manera que ésta pueda empalmarse (unirse) sin pérdidas luminosas altas.

15.7.4 Sistemas modernos de comunicación de fibra óptica

Los más modernos sistemas de comunicación por fibra óptica utilizan fibra unimodo con un transmisor de diodo láser de heterounión doble de InGaAsP (figura 15.22*a*) operado a la longitud de onda infrarroja de 1.3 μm, donde las pérdidas luminosas son

mínimas. Suele utilizarse un fotodiodo PIN de InGaAs/InP para el detector (figura 15.22*b*). Con este sistema óptico las señales pueden enviarse a casi 40 km (25mi) antes de que tengan que repetirse. En diciembre de 1988 el primer sistema de comunicaciones por fibras ópticas trasatlántico empezó operaciones con una capacidad de 40 000 llamadas telefónicas simultáneas. Hacia 1993 había 289 enlaces de cables de fibra óptica submarinos.

Otra ventaja de los sistemas de comunicación por fibra óptica ha sido la introducción de los *amplificadores por fibra óptica impurificados con erbio* (e*r*bium-d*oped optical* f*iber* a*mplifiers*) (EDFA). Un EDFA es una longitud (por lo común alrededor de 20 a 30 m [64 a 96 pies]) de fibra de silicio óptica impurificada con el elemento de erbio de tierras raras para proporcionar ganancia a la fibra. Cuando se bombea en forma óptica con luz de un láser semiconductor exterior, la fibra impurificada con erbio aumenta la potencia de todas las señales que pasan a través de ella con longitudes de onda centradas en 1.55 μm. De este modo, la fibra óptica impurificada con erbio sirve tanto como un medio de operación láser (*lasing*) como una guía de luz. Los EDFA pueden utilizarse en sistemas de transmisión ópticos para aumentar la potencia de la señal luminosa en la fuente (amplificador de potencia), en el receptor (preamplificador) y a lo largo del enlace de comunicación de la fibra (repetidor en línea). Los primeros EDFA se utilizaron en 1993 en la red de AT&T en un enlace entre San Francisco y Point Arena, California.

15.8 MATERIALES SUPERCONDUCTORES

15.8.1 El estado superconductor

La resistividad eléctrica de un metal normal como el cobre disminuye de manera uniforme cuando se reduce la temperatura y se alcanza un valor residual bajo cercano a 0 K (figura 15.23). En contraste, cuando la temperatura disminuye la resistividad eléctrica de mercurio puro decrece repentinamente a 4.2 K hasta un valor inmensurable-

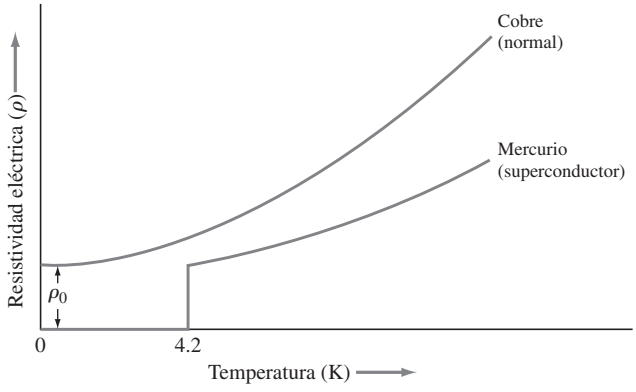


Figura 15.23
Resistividad eléctrica de un metal normal (Cu) comparada con la de un metal superconductor (Hg) como una función de la temperatura cerca de 0 K. La resistividad del metal superconductor disminuye repentinamente hasta un valor inmensurablemente pequeño.

Tabla 15.3 Temperaturas superconductoras críticas T_c de materiales para superconductores de metales seleccionados y compuestos intermetálicos y cerámicos

Metales	T_c (K)	H_0* (T)	Compuestos intermetálicos	T_c (K)	Compuestos cerámicos	T_c (K)
Niobio, Nb	9.15	0.1960	Nb_3Ge	23.2	$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_x$	122
Vanadio, V	5.30	0.1020	Nb_3Sn	21	$YBa_2Cu_3O_{7-x}$	90
Tantalio, Ta	4.48	0.0830	Nb_3Al	17.5	$Ba_{1-x}K_xBiO_{3-y}$	30
Titanio, Ti	0.39	0.0100	NbTi	9.5		
Estaño	3.72	0.0306				

*H_0 = temperatura críticas en teslas (T) a 0 K.

mente pequeño. Este fenómeno recibe el nombre de *superconductividad*, y el material que muestra este comportamiento se denomina *material superconductor*. Alrededor de 26 metales son superconductores, así como cientos de aleaciones y compuestos.

La temperatura por debajo de la cual la resistividad eléctrica de un material tiende a cero recibe el nombre de **temperatura crítica T_c**. Arriba de esta temperatura el material se denomina *normal*, y debajo de T_c se dice que es *superconductivo* o *superconductor*. Además de la temperatura, el estado superconductor depende también de muchas otras variables, de las cuales las más importantes son el campo magnético B y la densidad de corriente J. De este modo, para que un material sea superconductor, la temperatura crítica del material, el campo magnético y la densidad de corriente no deben excederse, y para cada material superconductor existe una superficie crítica en el espacio T, B, J.

Las temperaturas de superconducción crítica de algunos materiales seleccionados, compuestos intermetálicos y nuevos compuestos cerámicos se enlistan en la tabla 15.3. Los valores extremadamente altos de T_c (90-122 K) de los recientemente descubiertos (1987) compuestos cerámicos, sobresalen y fueron una sorpresa para la comunidad científica. Algunos aspectos de su estructura y propiedades se discutirán después en esta sección.

15.8.2 Propiedades magnéticas de superconductores

Si un campo magnético suficientemente intenso se aplica a un superconductor a cualquier temperatura por debajo de su temperatura crítica T_c, el superconductor regresará a su estado normal. El campo magnético aplicado necesario para restaurar la conductividad eléctrica normal en el superconductor se denomina **campo crítico H_c**. En la figura 15.24*a* se presenta esquemáticamente la relación entre el campo magnético crítico H_c y la temperatura (K) a corriente cero. Debe señalarse que a una **densidad de corriente (crítica) J_c** eléctrica suficientemente alta también se destruiría la superconductividad en materiales. La curva de H_c en función de T (K) puede aproximarse por medio de

$$H_c = H_0\left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right] \qquad \textbf{(15.10)}$$

donde H_0 es el campo crítico a $T = 0$ K. La ecuación 15.10 representa la frontera entre los estados superconductor y normal del superconductor. En la figura 15.24*b* se presenta el campo crítico en función de las gráficas de temperatura de varios metales superconductores.

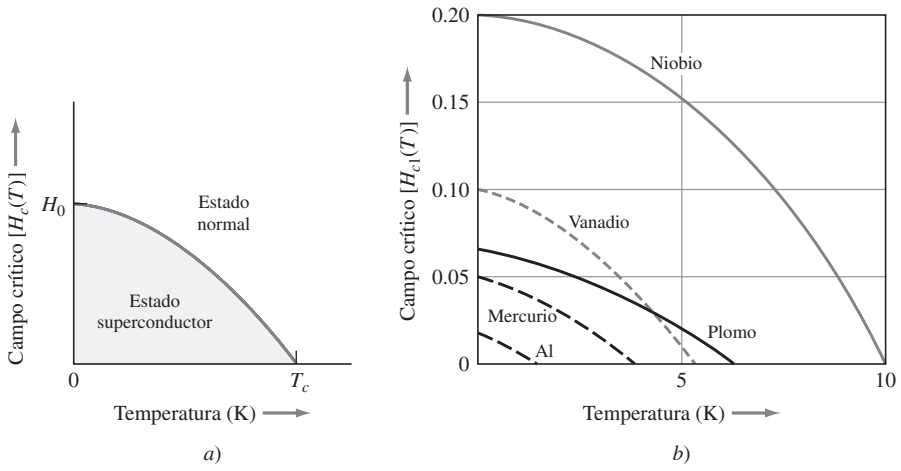


Figura 15.24
Campo crítico en función de la temperatura. *a*) Caso general. *b*) Curvas para varios superconductores.

PROBLEMA DE EJEMPLO 15.8

Calcule el valor aproximado del campo crítico necesario para provocar que la superconductividad de metal de niobio puro desaparezca a 6 K.

■ Solución

De acuerdo con la tabla 15.3 a 0 K, la T_c para el Nb es de 9.15 K y su $H_0 = 0.1960$ T. Según la ecuación 15.10,

$$H_c = H_0\left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right] = 0.1960\left[1 - \left(\frac{6}{9.15}\right)^2\right] = 0.112 \text{ T} \blacktriangleleft$$

De acuerdo con su comportamiento en un campo magnético aplicado, los superconductores metálicos e intermetálicos se clasifican en superconductores tipo I y tipo II. Si un cilindro largo de un **superconductor de tipo I** tal como Pb o Sn se coloca en un campo magnético a temperatura ambiente, el campo magnético penetrará normalmente a través del metal (figura 15.25*a*). Sin embargo, si la temperatura de un superconductor de tipo I disminuye por debajo de su T_c (7.19 K para Pb) y su campo magnético está por debajo de H_c, el campo magnético será expulsado del espécimen excepto por una muy delgada capa de penetración de alrededor de 10^{-5} en la superficie (figura 15.25*b*). Esta propiedad de una exclusión de campo magnético en el estado superconductor se conoce como **efecto Meissner**.

Los **superconductores de tipo II** se comportan de manera diferente en un campo magnético a temperaturas por debajo de T_c. Son altamente diamagnéticos como los superconductores tipo I hasta un campo magnético aplicado crítico, el cual recibe el nombre de **campo crítico inferior H_{c1}** (figura 15.26), y de este modo el flujo magnético se excluye del material. Arriba de H_{c1} el campo magnético empieza a penetrar al superconductor de tipo II y continúa haciéndolo hasta que se alcanza el **campo crítico superior H_{c2}**. Entre H_{c1} y H_{c2} el superconductor está en el estado mezclado, y arriba

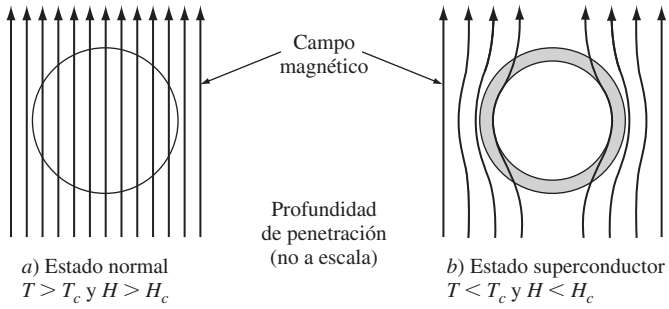


Figura 15.25
El efecto Meissner. Cuando la temperatura de un superconductor tipo I disminuye por debajo de T_c y el campo magnético es menor que H_c, el campo magnético es totalmente expulsado de una muestra excepto por una delgada capa superficial.

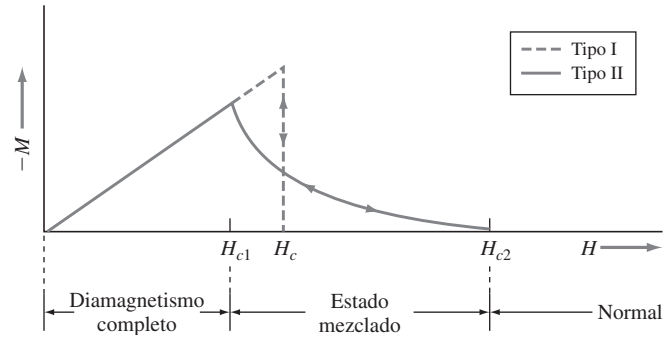


Figura 15.26
Curvas de magnetización para superconductores ideales tipo I y tipo II. El campo magnético penetra los superconductores tipo II entre H_{c1} y H_{c2}.

de H_{c2} regresa al estado normal. En la región H_{c1} y H_{c2} el superconductor puede conducir corriente eléctrica dentro del material, y, en consecuencia, esta región de campo magnético puede utilizarse para superconductores de alto campo y alta corriente tales como NiTi y Ni_3Sb, los cuales son superconductores de tipo II.

15.8.3 Flujo de corriente y campos magnéticos en superconductores

Los superconductores de tipo I son pobres portadores de corriente eléctrica puesto que ésta sólo puede fluir en la capa de la superficie exterior de un espécimen conductor (figura 15.27*a*). La razón de este comportamiento es que el campo magnético sólo puede penetrar la capa superficial, y sólo es posible que la corriente fluya en esta capa. En los superconductores tipo II debajo de H_{c1}, los campos magnéticos se comportan de la misma manera. Sin embargo, si el campo magnético está entre H_{c1} y H_{c2} (estado mixto), la corriente puede llevarse al interior del superconductor por medio de filamentos,

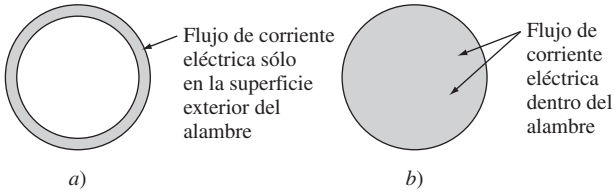


Figura 15.27
Sección transversal de un alambre superconductor que conduce una corriente eléctrica. *a*) Superconductor tipo I o tipo II sujeto a un campo bajo ($H < H_{c1}$). *b*) Superconductor tipo II bajo campos superiores donde la corriente se transporta mediante una red de filamentos ($H_{c1} < H < H_{c2}$).

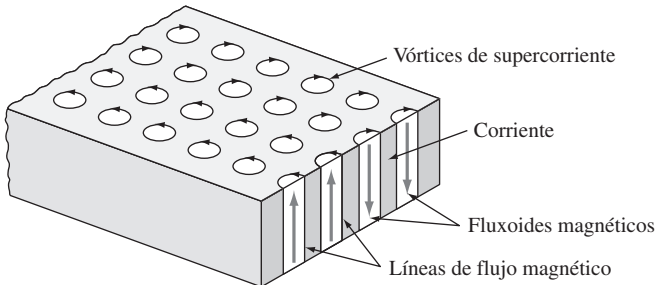


Figura 15.28
Ilustración esquemática que muestra los fluxoides magnéticos en un superconductor tipo II con un campo magnético entre H_{c1} and H_{c2}.

como se indica en la figura 15.27*b*. En los superconductores tipo II, cuando se aplica un campo magnético entre H_{c1} y H_{c2}, el campo penetra la masa del superconductor en la forma de paquetes de flujo cuantizados individuales denominados **fluxoides** (figura 15.28). Un vórtice de supercorriente cilíndrica rodea a cada fluxoide. Con el aumento de la intensidad del campo magnético, más y más fluxoides entran en el superconductor y forman un arreglo periódico. A H_{c2} la estructura del vórtice de supercorriente se colapsa y el material regresa a su estado conductor normal.

15.8.4 Superconductores de alto campo y alta corriente

A pesar de que los superconductores tipo II ideales pueden ser penetrados por un campo magnético aplicado en el intervalo de H_{c1} a H_{c2}, éstos tienen una pequeña capacidad de transporte de corriente por debajo de T_c, ya que los fluxoides están unidos débilmente a la retícula cristalina y son relativamente móviles. La movilidad de los fluxoides puede ser afectada en gran medida por dislocaciones, fronteras de grano y precipitados finos, y por ello J_c puede elevarse mediante trabajo en frío y tratamientos térmicos. Se recurre al tratamiento térmico de la aleación de Nb con 45% en peso de Ti para precipitar una fase hexagonal α en la matriz BCC de la aleación para inmovilizar los fluxoides.

La aleación de Nb con 45% en peso de Ti y el compuesto Nb_3Sn se han convertido en los materiales básicos para la moderna tecnología de superconductores de alto campo y alta corriente. El Ni con 45% en peso de Ti comercial se ha estado produciendo con $T_c \approx 9$ K y $H_{c2} \approx 6$ T y Nb_3Sn con un $T_c \approx 18$ K y $H_{c2} \approx 11$ T. En la tecnología de superconductores actual estos superconductores se emplean a temperatura de helio líquido (4.2 K). La aleación de Nb con 45% en peso de Ti es más dúctil y fácil de fabricar que el compuesto de Nb_3Sn y por ello se prefiere un muchas aplicaciones aun cuando tiene valores inferiores de T_c y H_{c2}. Los alambres comerciales se hacen de muchos filamentos de NbTi, por lo común, de aproximadamente 25 μm de diámetro, embebidos en una matriz de cobre (figura 15.29). El propósito de la matriz de cobre es estabilizar el alambre superconductor durante la operación, de manera que no se desarrollen puntos calientes que puedan causar que el material superconductor vuelva al estado normal.

Entre las aplicaciones de los superconductores de NbTi y Nb_3Sn se incluyen los sistemas de imágenes magnéticas nucleares para diagnóstico médico y la levitación magnética de vehículos, como trenes de alta velocidad (figuras 15.1*c* y *d*). Los imanes superconductores de alto campo se usan en aceleradores de partículas en el campo de la física de altas energías.

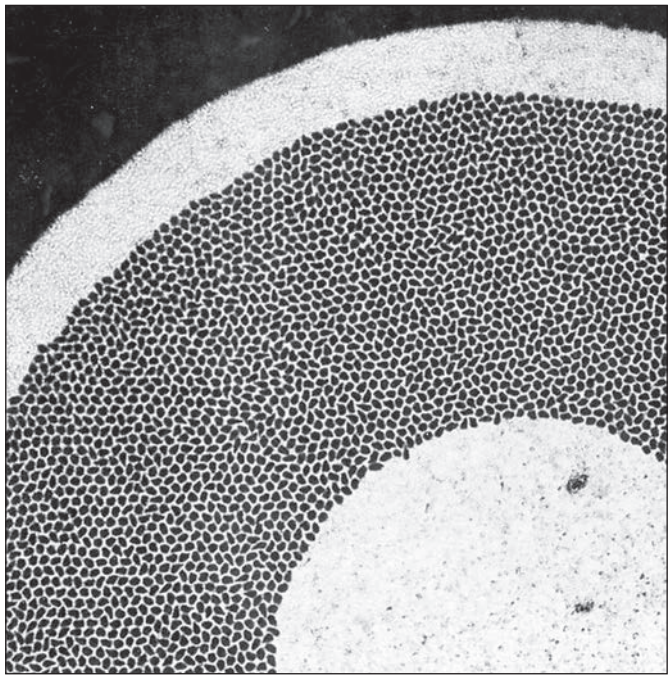


Figura 15.29
Sección transversal de un alambre compuesto de Nb con 46.5% en peso de Ti-Cu elaborado para el superacelerador superconductor. El alambre tiene un diámetro de 0.0808 cm (0.0318 pulg), un cociente volumétrico de Cu:NbTi de 1.5, 7250 filamentos de diámetros de 6 μm y una $J_c = 2990$ A/mm^2 a 5 T y una $J_c = 1256$ A/mm^2 a 8 T (amplificación de 200×).
(Cortesía de Advanced Superconductors Inc.)

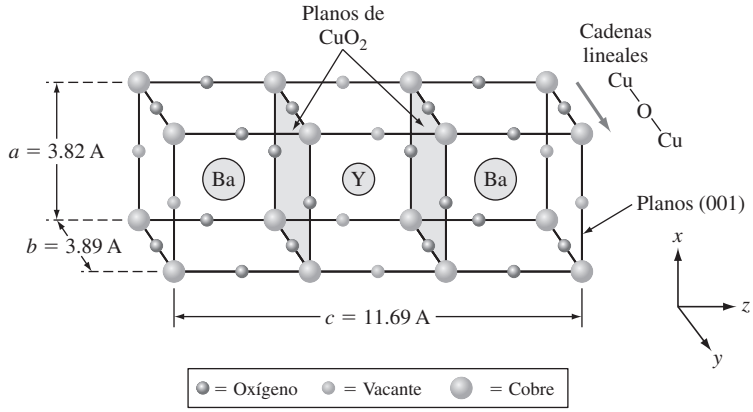


Figura 15.30
Estructura cristalina ortorrómbica ideal del $YBa_2Cu_3O_7$. Adviértase la ubicación de los planos de CuO_2.

15.8.5 Óxidos superconductores de alta temperatura crítica (T_c)

En 1987 se descubrieron superconductores con temperaturas críticas de alrededor de 90 K, lo que sorprendió a la comunidad científica puesto que hasta este tiempo la T_c más alta para superconductores había sido de 23 K. El material de T_c alta que más se ha estudiado ha sido el compuesto $YBa_2Cu_3O_y$, y por ello la atención se centrará en algunos aspectos de su estructura y propiedades. Desde el punto de vista de la estructura cristalina, puede considerarse que este compuesto tiene una estructura de perovskita defectuosa con tres celdas unitarias cúbicas de perovskita apiladas una encima de la otra (figura 15.30). (La estructura de perovskita para $CaTiO_3$ se muestra en la figura 11.16.) En una pila ideal de tres celdas unitarias cúbicas de perovskita, el compuesto $YBa_2Cu_3O_y$ debe tener la composición $YBa_2Cu_3O_9$, en la que y sería igual a 9. Sin embargo, los análisis demuestran que y varía de 6.65 a 6.90 para que este material sea un superconductor. En $y = 6.90$, su T_c es más alta ($\sim$90 K), y en $y = 6.65$, la superconductividad desaparece. De tal modo, las vacantes de oxígeno desempeñan un papel en el comportamiento de la superconductividad del $YBa_2Cu_3O_y$.

El compuesto $YBa_2Cu_3O_y$, cuando se enfría lentamente desde una temperatura superior a 750°C en presencia de oxígeno, experimenta un cambio de estructura cristalina de tetragonal a ortorrómbica (figura 15.31*a*). Si el contenido de oxígeno es cercano a $y = 7$, su T_c es de casi 90 K (figura 15.31*b*) y su celda unitaria tiene las constantes $a = 3.82$ Å, $b = 3.88$ Å, y $c = 11.6$ Å (figura 15.30). Para tener altos valores de T_c, los átomos de oxígeno en los planos (001) deben ordenarse de manera que las vacancias de oxígeno estén en la dirección a. Se cree que la superconductividad se confina en los planos CuO_2 (figura 15.30), donde las vacancias de oxígeno proporcionan un acoplamiento de electrones entre los planos CuO_2. Una micrografía de microscopia electrónica de transmisión (figura 15.32) muestra el apilamiento de los átomos de Ba e Y de la estructura del $YBa_2Cu_3O_y$.

Desde el punto de vista de la ingeniería, los nuevos superconductores de T_c alta prometen mucho en cuanto a los avances técnicos. Con una T_c a 90 K, el nitrógeno

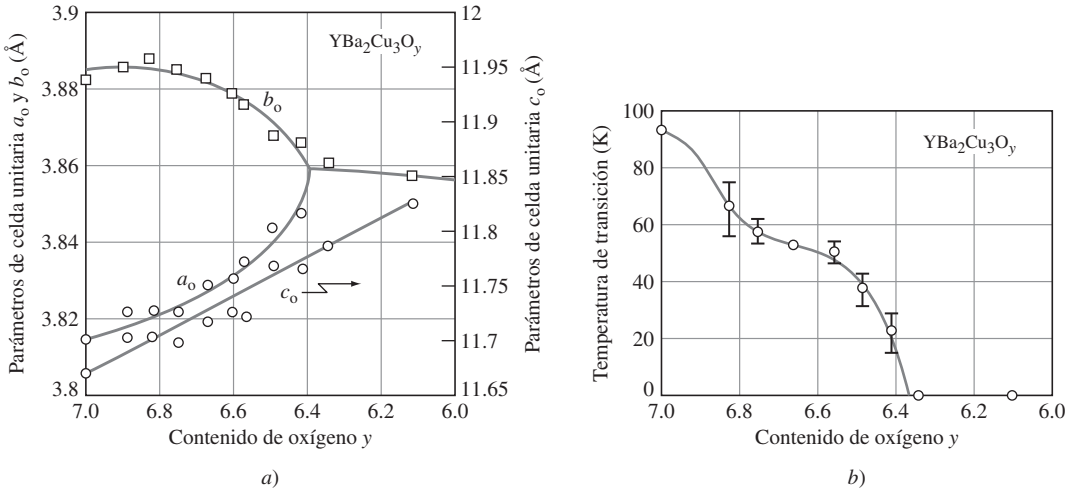


Figura 15.31
a) Contenido de oxígeno en función de las constantes de celda unitaria para $YBa_2Cu_3O_y$. *b*) Contenido de oxígeno en función de T_c para $YBa_2Cu_3O_y$.
(Tomado de J. M. Tarascon y B. G. Bagley, MRS Bull., enero de 1989, p. 55.)

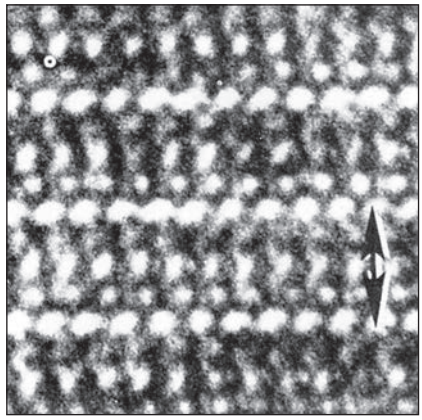


Figura 15.32
Micrografía (MET) de alta resolución en la dirección [100] por cadenas de cobre-oxígeno e hileras de átomos de Ba e Y en la celda unitaria de $YBa_2Cu_3O_y$ como se indica mediante la flecha.
(Tomado de J. Narayan, JOM, enero de 1989, p. 18.)

líquido puede usarse como un refrigerante para sustituir al helio líquido, mucho más caro. Desafortunadamente, los superconductores de alta temperatura son casi todos cerámicos, los cuales son quebradizos y en su forma pura tienen una baja capacidad de densidad de corriente. Las primeras aplicaciones para estos materiales probablemente estarán en la tecnología de películas delgadas para sistemas electrónicos como las computadoras de alta velocidad.

15.9 DEFINICIONES

Sección 15.3

Índice de refracción: el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la correspondiente al otro medio de interés.

Sección 15.4

Absorción: la fracción de luz incidente que absorbe un material.

Sección 15.5

Luminiscencia: absorción de luz u otra energía por un material y la emisión subsecuente de luz de longitud de onda más larga.

Fluorescencia: absorción de luz u otra energía por un material y la emisión subsecuente de luz dentro de 10^{-8} s de excitación.

Fosforescencia: absorción de luz por un fósforo y su subsecuente emisión en tiempos mayores que 10^{-8} s.

Sección 15.6

Láser: acrónimo de *l*ight *a*mplification by *s*timulated *e*mission of *r*adiation (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación).

Haz láser: haz de radiación óptica coherente y monocromática generada por la emisión estimulada de fotones.

Inversión de población: condición en la que existen más átomos en un estado de energía superior que en uno inferior. Esta condición es necesaria para el efecto láser.

Sección 15.7

Comunicación por fibra óptica: método de transmisión de información mediante el uso de luz.

Atenuación luminosa: disminución en la intensidad de la luz.

Guía de onda óptica: una fibra delgada a lo largo de la cual la luz puede propagarse mediante reflexión total interna y refracción.

Sección 15.8

Estado superconductor: sólido en el estado superconductor que no muestra resistencia eléctrica.

Temperatura crítica T_c: temperatura debajo de la cual un sólido no muestra resistencia eléctrica.

Densidad de corriente crítica J_c: densidad de corriente sobre la cual desaparece la superconductividad.

Campo crítico H_c: campo magnético sobre el cual desaparece la superconductividad.

Efecto Meissner: la expulsión del campo magnético por un superconductor.

Superconductor tipo I: el que exhibe repulsión completa al flujo magnético entre los estados normal y superconductor.

Superconductor tipo II: aquel en el cual el flujo magnético penetra gradualmente entre los estados normal y superconductor.

Campo crítico inferior H_{c1}: el campo en que el flujo magnético penetra primero en un superconductor de tipo II.

Campo crítico superior H_{c2}: el campo en que desaparece la superconductividad en un superconductor tipo II.

Fluxoide: región microscópica rodeada por supercorrientes circulantes en un superconductor tipo II en campos entre H_{c2} y H_{c1}.

15.10 PROBLEMAS

Las respuestas a los problemas marcados con un asterisco se encuentran al final del libro.

15.1 Escriba la ecuación que relaciona la energía de radiación con su longitud de onda y frecuencia, y proporcione las unidades del SI de cada cantidad.

15.2 ¿Cuáles son los intervalos de longitud de onda y frecuencia aproximados para *a*) luz visible, *b*) luz ultravioleta y *c*) radiación infrarroja?

15.3 Un fotón en un semiconductor de ZnO cae desde un nivel de impureza a 2.30 eV hasta su banda de valencia. ¿Cuál es la longitud de onda de la radiación emitida por la transición? Si la radiación es visible, ¿cuál es su color?

15.4 Un semiconductor emite radiación visible verde a una longitud de onda de 0.520 μm. ¿Cuál es el nivel de energía a partir del cual los fotones caen hasta la banda de valencia para emitir este tipo de radiación?

15.5 Si se transmite luz ordinaria desde el aire a una lámina de polimetilmetacrilato de 1 cm de espesor, ¿la velocidad de la luz aumenta o disminuye luego de entrar en el plástico? Explique.

15.6 Explique por qué los diamantes cortados centellean. ¿Por qué el PbO se agrega algunas veces para fabricar vidrios decorativos?

15.7 ¿Cuál es la ley de Snell de la refracción de la luz? Utilice un diagrama para explicar.

15.8 ¿Cuál es el ángulo crítico para que la luz se refleje totalmente cuando sale de una placa plana de poliestireno y entre en el aire?

15.9 Explique por qué los metales absorben y/o relajan radiación incidente hasta la mitad del intervalo ultravioleta.

15.10 Explique por qué el oro es de color amarillo y la plata es "plateada".

***15.11** Calcule la reflectividad de la luz ordinaria proveniente de una superficie superior plana y lisa de *a*) vidrio de borosilicato ($n = 1.47$) y de *b*) polietileno ($n = 1.53$).

15.12 La luz incidente ordinaria incide en la superficie plana de un material transparente con un coeficiente de absorción lineal de 0.04 cm^{-1}. Si la placa del material es de 0.80 cm de espesor, calcule la fracción de luz absorbida por la misma.

15.13 La luz ordinaria incide sobre la superficie plana de una placa de material transparente. Si la placa mide 0.75 de espesor y absorbe 5.0 por ciento de la luz entrante, ¿cuál es el coeficiente de absorción lineal?

***15.14** Calcule la transmitancia de una placa de vidrio plana de 6.0 mm de espesor con un índice de refracción de 1.51 y un coeficiente de absorción lineal de 0.03 cm^{-1}.

15.15 ¿Por qué una lámina de polietileno de 2.0 mm de espesor tiene una claridad inferior a la de una lámina de plástico de policarbonato del mismo espesor?

***15.16** Calcule la longitud de onda mínima de la radiación que pueden absorber los siguientes materiales: *a*) GaP, *b*) GaSb y *c*) InP.

15.17 ¿Los siguientes materiales: *a*) CdSb, *b*) ZnSe y *c*) diamante, podrán absorber o transmitir la luz visible de una longitud de onda de 500 nm ($E_g = 5.40$ eV)?

15.18 Explique el proceso de luminiscencia.

15.19 Establezca la distinción entre fluorescencia y fosforescencia.

15.20 Explique el efecto de luminiscencia al operar una lámpara fluorescente.

15.21 Explique cómo se produce la imagen en una pantalla de televisor a color.

15.22 La intensidad de un fósforo de Al_2O_3 activado con cromo disminuye hasta 15 por ciento de su intensidad original en 5.6×10^{-3} s. Determine *a*) su tiempo de relajación y *b*) su intensidad porcentual retenida después de 5.0×10^{-2} s.

***15.23** Un fósforo de Zn_2SiO_4 activado con manganeso tiene un tiempo de relajación de 0.015 s. Calcule el tiempo requerido para que la intensidad de este material disminuya hasta 8 por ciento de su valor original.

15.24 Distinga entre radiación incoherente y coherente.

15.25 ¿Qué significan las letras en el acrónimo *láser*?

15.26 Explique la operación del láser de rubí.

15.27 ¿A qué se refiere el término *inversión de población* en la terminología láser?

15.28 Describa la operación y aplicación de los siguientes tipos de láser: *a*) niodimio-YAG, *b*) dióxido de carbono, *c*) GaAs de heterounión doble.

15.29 ¿Qué son las fibras ópticas?

15.30 ¿Cuáles son los elementos básicos de un sistema de comunicaciones por fibra óptica?

15.31 ¿Qué tipos de impurezas son perjudiciales en particular para la pérdida luminosa en fibras ópticas?

15.32 Si la intensidad luminosa original se reduce a 6.5 por ciento después de transmitirse 300 m a lo largo de una fibra óptica, ¿cuál es la atenuación de la luz en decibeles por kilómetro (dB/km) de este tipo de fibra óptica?

15.33 Se atenúa luz en una fibra óptica que opera a una longitud de 1.55 μm a -0.25 dB/km. Si se va a retener 4.2 por ciento de la luz en una estación repetidora, ¿cuál debe ser la distancia entre las repetidoras?

***15.34** La atenuación de un cable trasatlántico submarino de fibra óptica de 1.3 μm es -0.31 dB/km, y la distancia entre las repetidoras en el sistema corresponde a 40.2 km (25 mi). ¿Cuál es el porcentaje de la luz retenida en una repetidora si se supone 100 por ciento al inicio de una repetidora?

15.35 Explique cómo las fibras ópticas actúan como guías de onda.

15.36 Distinga entre fibras ópticas tipo unimodo y multimodo. ¿Qué tipo se usa en los modernos sistemas de comunicación a larga distancia y por qué?

15.37 ¿Cómo se fabrican las fibras ópticas para sistemas de comunicaciones? ¿Cómo afectan el *a*) GeO_2 y el *b*) F el índice de refracción del vidrio de sílice?

15.38 ¿Qué tipos de láseres se usan en los modernos sistemas de fibras ópticas de larga distancia y por qué?

15.39 Una fibra óptica unimodo de un sistema de comunicaciones tiene un núcleo de vidrio de SiO_2–GeO_2 con un índice de refracción de 1.4597 y un revestimiento de vidrio de SiO_2 puro con un índice de refracción de 1.4580. ¿Cuál es el ángulo crítico para que la luz que sale del núcleo se refleje totalmente dentro del mismo?

15.40 ¿Cuál es el estado superconductor de un material?

15.41 ¿Cuál es la importancia de T_c, H_c y J_c para un superconductor?

15.42 Describa la diferencia entre los superconductores de tipo I y tipo II.

15.43 ¿Qué es el efecto Meissner?

15.44 ¿Por qué los superconductores tipo I son pobres conductores de corriente?

15.45 ¿Qué son los fluxoides? ¿Qué papel desempeñan éstos en la superconductividad de superconductores tipo II en el estado mezclado?

15.46 ¿Cómo pueden fijarse los fluxoides en superconductores tipo II? ¿Cuál es la consecuencia de fijarlos en un superconductor tipo II?

***15.47** Calcule el campo magnético crítico H_{c1} en teslas para niobio a 8 K. Emplee la ecuación 15.10 y los datos de la tabla 15.3.

15.48 Si el vanadio tiene un valor H_c de 0.06 T y es superconductor, ¿cuál debe ser su temperatura?

15.49 Describa la estructura cristalina del $YBa_2Cu_3O_7$. Utilice un dibujo.

15.50 ¿Por qué el compuesto $YBa_2Cu_3O_y$ debe enfriarse lentamente desde aproximadamente 750°C para que este compuesto sea altamente superconductor?

15.51 ¿Cuáles son algunas ventajas y desventajas de los nuevos superconductores de óxido de alta temperatura?

15.11 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. Diseñe un semiconductor que produciría fotones con longitudes de onda correspondientes a las de la luz verde.

2. El ZnS tiene una E_g de 2.76 eV. *a*) ¿Cuál sería el color de la radiación correspondiente a su fotón? *b*) ¿Cómo modificaría usted el semiconductor para producir un color de radiación diferente?

3. Seleccione un plástico óptico que tenga un ángulo crítico de 45 grados para que la luz se refleje totalmente cuando salga de la placa plana y entre en el aire (use la tabla 15.1).

4. *a*) Elija un material de la tabla 15.1 que tenga una reflectividad de luz incidente ordinaria de alrededor de 5 por ciento. *b*) Elija un material con el nivel más alto de reflectividad. *c*) Seleccione un material con el nivel más bajo de reflectividad. (Suponga que todas las superficies son lisas.)

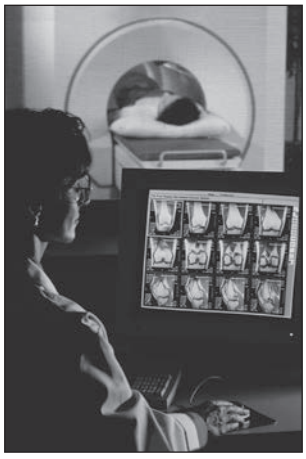
5. Diseñe el espesor de un vidrio de silicato pulido que produciría *a*) no más de 2 por ciento de pérdidas de luz debido a la absorción y *b*) no más de 4 por ciento de pérdidas de luz por la absorción.

6. Explique cómo el tiempo de relajación de un fósforo de un televisor a color puede afectar la calidad de la imagen.

7. Elija un material para la transmisión óptica a lo largo de una longitud de 30 km sea tal que al menos permanezca 15 por ciento de la intensidad luminosa de la fuente.

CAPÍTULO

16 Propiedades magnéticas



(a © Corbis)

(b y c © Neil Borden/Photo Researchers, Inc.)

La técnica de imágenes por resonancia magnética (MRI, por sus siglas en inglés) se utiliza para extraer imágenes de alta calidad del interior del cuerpo humano. Permite a médicos y científicos investigar enfermedades en forma segura relacionadas con el corazón, el cerebro, la espina dorsal y otros órganos del cuerpo humano. Las imágenes que produce la MRI se deben principalmente a la existencia de moléculas de grasa y agua que están hechas sobre todo de hidrógeno. En resumen, el hidrógeno produce una pequeña señal magnética que detecta el instrumento y se utiliza para hacer un mapa del tejido.

El hardware de la MRI se presenta en la figura. Consiste en un gran imán que produce el campo magnético; la bobina que produce un gradiente en el campo; la bobina RF que detecta la señal de las moléculas dentro del cuerpo humano. El imán es el componente más costoso del sistema y suele ser de tipo semiconductor (alambre de varias millas de longitud). En conjunto la MRI es un sistema complejo que requiere conocimientos expertos de matemáticos, físicos, químicos y científicos de materiales. También requiere los conocimientos de bioingenieros, científicos de imágenes y arquitectos para diseñar e implementar una máquina eficiente con aplicación segura.

La tecnología MRI se usa, por ejemplo, en la ortopedia, donde es posible producir con exactitud imágenes del daño en tejido blando. Las imágenes MRI de arriba muestran un ligamento cruzado anterior sano (izquierda) y uno roto (derecha). Dependiendo de qué tan extendido esté el daño, el cirujano decidirá utilizar la cirugía ortroscópica para restituir el ligamento dañado. ■

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, los estudiantes serán capaces de:

1. Describir de manera breve las dos fuentes de momentos magnéticos en materiales.
2. Describir la histéresis magnética de un material.
3. Describir características magnéticas distintivas para materiales magnéticos duros y blandos.
4. Describir cómo al incrementar la temperatura se altera el alineamiento de dipolos magnéticos en material ferromagnético.
5. Describir la naturaleza del paramagnetismo.
6. Explicar qué significa el alnico.
7. Describir algunas aplicaciones industriales de ferritas blandas.
8. Describir brevemente la fuente del antiferromagnetismo.
9. Dibujar un lazo de histéresis de un material ferromagnético.
10. Describir la permeabilidad magnética relativa y la permeabilidad magnética.

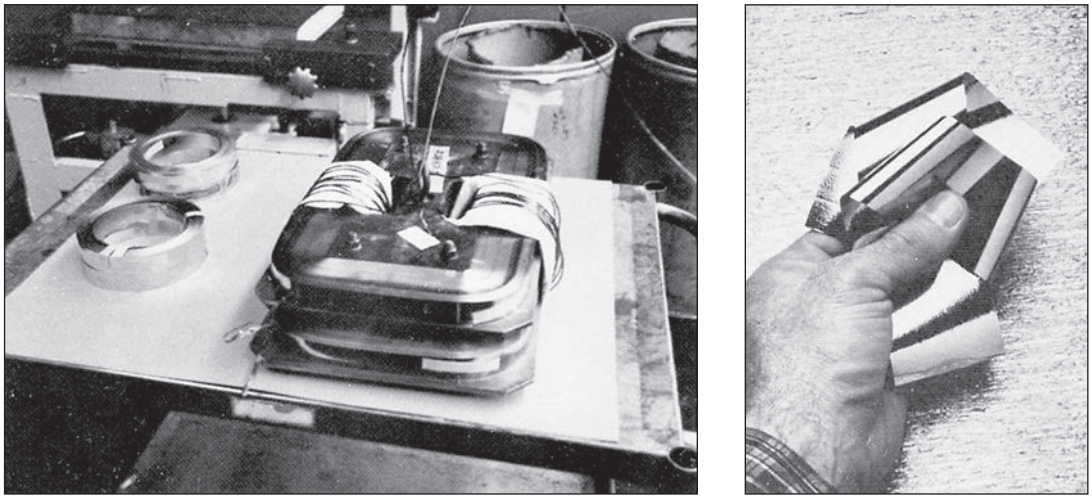
16.1 INTRODUCCIÓN

Los materiales magnéticos son necesarios en muchos diseños de ingeniería, en particular en el área de ingeniería eléctrica. En general, hay dos tipos principales: *materiales magnéticos blandos* y *duros*. Los primeros se utilizan en aplicaciones en las que el material debe magnetizarse y desmagnetizarse con facilidad, como en los núcleos de los transformadores de distribución eléctrica (figura 16.1*a*), en los pequeños transformadores electrónicos y en materiales del estator y el rotor de motores y generadores. Por otro lado, los materiales magnéticos duros se emplean en aplicaciones que requieren imanes permanentes que no se desmagneticen con facilidad, como los imanes permanentes en altavoces, receptores telefónicos, motores síncronos y sin escobillas, así como motores de encendido automotriz.

16.2 CAMPOS Y CANTIDADES MAGNÉTICAS

16.2.1 Campos magnéticos

Se inicia el estudio de los materiales magnéticos revisando primero algunas de las propiedades fundamentales del magnetismo y de los campos magnéticos. Los metales *hierro, cobalto* y *níquel* son los únicos tres metales elementales que, cuando se magnetizan a temperatura ambiente, pueden producir un intenso campo magnético alrededor de ellos mismos. Se dice que éstos son **ferromagnéticos**. La presencia de un **campo mag-**



a) *b*)

Figura 16.1
a) Un nuevo material magnético para diseños de ingeniería: se emplea material de vidrio metálico para los núcleos magnéticos de transformadores de distribución eléctrica. El empleo de aleaciones de vidrio metálico amorfas con altos niveles de blandura magnética en núcleos de transformador reduce las pérdidas de energía en casi 70 por ciento en comparación con los fabricados a partir de aleaciones convencionales de hierro-silicio.
(Cortesía de General Electric Co.)
b) Tira de cinta de vidrio metálico
(Cortesía de Metglas, Inc.)

nético que rodea a una barra de hierro magnetizada puede revelarse dispersando pequeñas partículas de hierro sobre una hoja de papel situada justo arriba de la barra (figura 16.2). Como se muestra en la figura 16.2, el imán de barra tiene dos polos magnéticos, y las líneas de campo magnético parecen salir de un polo y entrar en el otro.

En general, el magnetismo es de naturaleza dipolar, y nunca se ha descubierto un monopolo magnético. Siempre hay dos polos o centros magnéticos de un campo magnético separados por una distancia finita, y este comportamiento dipolar se extiende hasta los pequeños dipolos magnéticos encontrados en algunos átomos.

Los campos magnéticos son producidos también por conductores que transportan corriente. En la figura 16.3 se ilustra la formación de un campo magnético alrededor de una larga bobina de alambre de cobre, llamada *solenoide*, cuya longitud es larga con respecto a su radio. Para un solenoide de n vueltas y longitud l, la intensidad de campo magnético H es

$$H = \frac{0.4\pi ni}{l} \qquad \textbf{(16.1)}$$

donde i es la corriente. La intensidad de campo magnético H tiene unidades del SI de amperes por metro (A/m) y unidades cgs de oersteds (Oe). La igualdad de conversión entre las unidades del SI y cgs para H es $1\ \text{A/m} = 4\pi \times 10^{-3}$ Oe.

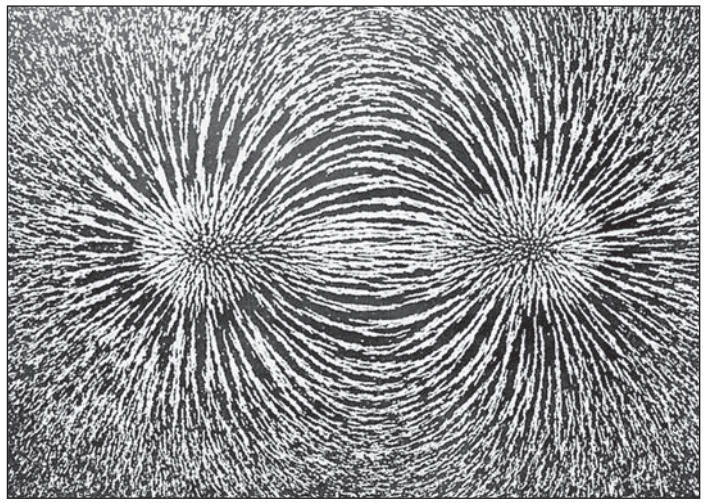


Figura 16.2
El campo magnético que rodea a un imán de barra se revela mediante el arreglo de limaduras de hierro colocadas sobre una hoja de papel arriba del imán. Adviértase que el imán de barra es dipolar y que las líneas magnéticas de fuerza parecen salir de un extremo del imán y regresar al otro.
(Cortesía de Physical Science Study Committee, en la forma que aparece D. Halliday y R. Resnick, "Fundamentals of Physics", Wiley, 1974, p. 612.)

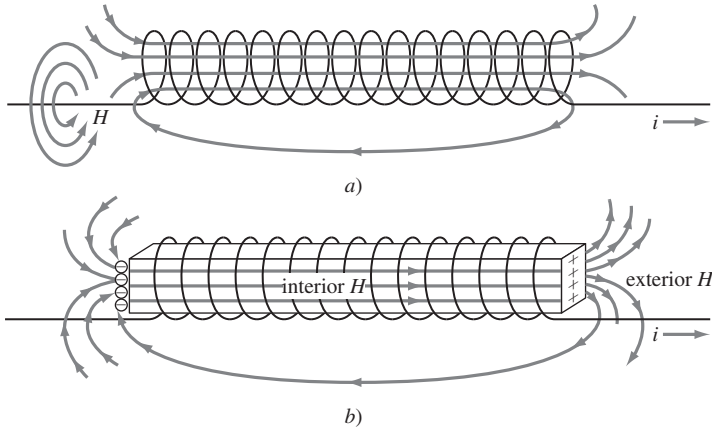


Figura 16.3
a) Ilustración esquemática de un campo magnético creado alrededor de una bobina de alambre de cobre, que se conoce como solenoide, mediante el paso de corriente a través del alambre. *b*) Ilustración esquemática del aumento en el campo magnético alrededor del solenoide cuando se coloca una barra de hierro dentro del mismo y pasa corriente a través del alambre.
(Tomado de C. S. Barrett, W. D. Nix, y A. S. Tetelman, "Principles of Engineering Materials", Prentice-Hall, 1973, p. 459.)

16.2.2 Inducción magnética

A continuación considérese que se coloca una barra de hierro desmagnetizada dentro del solenoide y se aplica una corriente de magnetización a este último, como se ilustra en la figura 16.3*b*. El campo magnético fuera del solenoide es ahora más intenso con la barra magnetizada dentro del solenoide. El campo magnético incrementado fuera del solenoide se debe a la suma del propio campo de este último y al campo magnético externo de la barra magnetizada. El nuevo campo magnético aditivo se denomina **inducción magnética** o *densidad de flujo*, o simplemente *inducción*, y está dado por el símbolo *B*.

La inducción magnética *B* es la suma del campo aplicado *H* y el campo externo que surge de la magnetización de la barra dentro del solenoide. El momento magnético inducido por unidad de volumen debido a la barra, recibe el nombre de *intensidad de magnetización* o **magnetización**, y se indica por el símbolo *M*. En el sistema de unidades SI,

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0(H + M) \qquad \textbf{(16.2)}$$

donde μ_0 = *permeabilidad en el vacío* = $4\pi \times 10^{-7}$ tesla-metro por ampere (T · m/A).[1] μ_0 no tiene significado físico y sólo se necesita en la ecuación 16.2 porque se eligieron unidades del SI. Las unidades del SI para *B* son webers[2] por metro cuadrado (Wb/m^2) o teslas (T), y las unidades del SI para *H* y *M* son amperes por metro (A/m). La unidad cgs para *B* es el gauss (G) y para *H*, el oersted (Oe). En la tabla 16.1 se resumen estas unidades magnéticas.

Un punto importante que se debe advertir es que, para los materiales ferromagnéticos en muchos casos, la magnetización $\mu_0 M$ es mucho mayor que el campo magnético $\mu_0 H$, y a raíz de ello es posible utilizar la relación $B \approx \mu_0 M$. De este modo, para materiales ferromagnéticos, las cantidades *B* (inducción magnética) y *M* (magnetización) a veces se usan indistintamente.

16.2.3 Permeabilidad magnética

Como se señaló previamente, cuando un material ferromagnético se coloca en un campo magnético aplicado, la intensidad del campo magnético aumenta. Este aumento en

[1] Nikola Tesla (1856-1943). Inventor estadounidense de origen yugoslavo que desarrolló en parte el motor de inducción polifásica e inventó la bobina de Tesla (un transformador de aire). $1\ T = 1\ Wb/m^2 = 1\ V \cdot s/m^2$.

[2] $1\ Wb = 1\ V \cdot s$.

Tabla 16.1 Resumen de las unidades para cantidades magnéticas

Cantidad magnética	Unidades del SI	Unidades cgs
B (inducción magnética)	weber/metro^2 (Wb/m^2) o tesla (T)	gauss (G)
H (campo aplicado)	ampere/metro (A/m)	oersted (Oe)
M (magnetización)	ampere/metro (A/m)	
Factores de conversión numérica:		
$1\ A/m = 4\pi \times 10^{-3}$ Oe		
$1\ Wb/m^2 = 1.0 \times 10^4$ G		
Constante de permeabilidad		
$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ T \cdot m/A$		

la magnetización se mide mediante una cantidad llamada **permeabilidad magnética** μ, que se define como el cociente entre la inducción magnética B y el campo aplicado H, o

$$\mu = \frac{B}{H} \tag{16.3}$$

Si sólo hay vacío en el campo magnético aplicado, entonces

$$\mu_0 = \frac{B}{H} \tag{16.4}$$

donde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T · m/A = permeabilidad en el vacío, como se estableció anteriormente.

Un método alternativo que se utiliza para definir la permeabilidad magnética es la cantidad **permeabilidad relativa** μ_r, que es el cociente de μ/μ_0. Por tanto,

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{16.5}$$

y

$$B = \mu_0 \mu_r H \tag{16.6}$$

La permeabilidad relativa μ_r es una cantidad adimensional.

La permeabilidad relativa es una medida de la intensidad del campo magnético inducido. En cierto modo, la permeabilidad magnética de materiales magnéticos es análoga a la constante dieléctrica de materiales dieléctricos. Sin embargo, la permeabilidad magnética de un material ferromagnético no es una constante sino que cambia cuando se magnetiza el material, como se indica en la figura 16.4. La permeabilidad

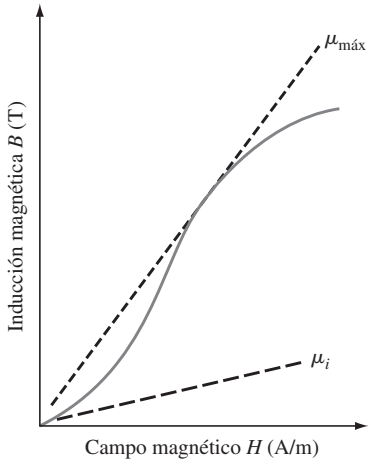


Figura 16.4
Curva de magnetización inicial *B-H* para un material ferromagnético. La pendiente μ_i es la permeabilidad magnética inicial, y la pendiente $\mu_{máx}$ es la permeabilidad magnética máxima.

magnética de un material magnético suele medirse ya sea por su permeabilidad inicial μ_i o por su permeabilidad máxima $\mu_{máx}$. En la figura 16.4 se indica cómo se mide μ_i y $\mu_{máx}$ a partir de las pendientes de la curva de magnetización inicial *B-H* para un material magnético. Los materiales magnéticos que se magnetizan con facilidad tienen permeabilidades magnéticas elevadas.

16.2.4 Susceptibilidad magnética

Puesto que el magnetismo de un material magnético es proporcional al campo aplicado, un factor de proporcionalidad denominado **susceptibilidad magnética** χ_m se define como

$$\chi_m = \frac{M}{H} \tag{16.7}$$

que es una cantidad adimensional. Las respuestas magnéticas débiles de materiales se miden a menudo en términos de la susceptibilidad magnética.

16.3 TIPOS DE MAGNETISMO

Los campos magnéticos y las fuerzas se originan a partir del movimiento de la carga eléctrica fundamental, el electrón. Cuando los electrones se mueven en un alambre conductor, se produce un campo magnético alrededor del alambre, como se muestra para el solenoide de la figura 16.3. El magnetismo en materiales se debe también al movimiento de electrones, pero en este caso los campos magnéticos y las fuerzas son resultado del espín intrínseco de los electrones y su movimiento orbital alrededor de sus núcleos (figura 16.5).

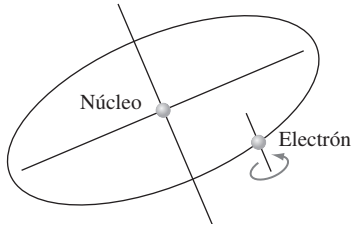


Figura 16.5
Dibujo esquemático del átomo de Bohr que muestra un electrón girando sobre su propio eje y alrededor de su núcleo. El espín del electrón sobre su eje y su movimiento orbital alrededor de su núcleo son los orígenes del magnetismo en materiales.

Tabla 16.2 Susceptibilidades magnéticas de algunos elementos diamagnéticos y paramagnéticos

Elemento diamagnético	Susceptibilidad magnética $\chi_m \times 10^{-6}$	Elemento paramagnético	Susceptibilidad magnética $\chi_m \times 10^{-6}$
Cadmio	−0.18	Aluminio	+0.65
Cobre	−0.086	Calcio	+1.10
Plata	−0.20	Oxígeno	+106.2
Estaño	−0.25	Platino	+1.10
Zinc	−0.157	Titanio	+1.25

16.3.1 Diamagnetismo

Un campo magnético externo que actúa sobre los átomos de un material desequilibra ligeramente sus electrones orbitales y crea pequeños dipolos magnéticos dentro de los átomos que se oponen al campo aplicado. Esta acción produce un efecto magnético negativo conocido como **diamagnetismo**. El efecto diamagnético produce una susceptibilidad magnética negativa muy pequeña del orden de $\chi_m \approx -10^{-6}$ (tabla 16.2). El diamagnetismo ocurre en todos los materiales, pero en muchos su efecto magnético negativo se cancela mediante efectos magnéticos positivos. El comportamiento diamagnético no tiene importancia significativa en la ingeniería.

16.3.2 Paramagnetismo

Los materiales que exhiben una pequeña susceptibilidad magnética positiva en la presencia de un campo magnético, se denominan *paramagnéticos*, y el efecto magnético recibe el nombre de **paramagnetismo**. El efecto paramagnético en materiales desaparece cuando se suprime el campo magnético aplicado. El paramagnetismo produce susceptibilidades magnéticas en materiales que varían de 10^{-6} a 10^{-2}, y se produce en muchos materiales. En la tabla 16.2 se enlistan las susceptibilidades magnéticas de materiales paramagnéticos a 20°C. El paramagnetismo se produce por la alineación de momentos de los dipolos magnéticos individuales de átomos o moléculas en un campo magnético aplicado. Puesto que la agitación térmica hace aleatorias las direcciones de los dipolos magnéticos, un incremento en la temperatura disminuye el efecto paramagnético.

Los átomos de algunos elementos de transición y de tierras raras poseen capas internas incompletas con electrones no apareados. Estos electrones internos no apareados en átomos, puesto que no son contrabalanceados por otros electrones de enlace en sólidos, provocan fuertes efectos paramagnéticos, y en algunos casos producen efectos ferromagnéticos y ferrimagnéticos muy intensos, los cuales se discutirán más adelante.

16.3.3 Ferromagnetismo

El diamagnetismo y el paramagnetismo se inducen mediante un campo magnético aplicado, y la magnetización permanece sólo mientras se mantiene el campo. Un tercer tipo de magnetismo, llamado **ferromagnetismo**, es de gran importancia en la in-

geniería. Es posible producir grandes campos magnéticos que pueden retenerse o eliminarse según se desee en materiales ferromagnéticos. Los elementos ferromagnéticos más importantes desde la perspectiva industrial, son el hierro (Fe), cobalto (Co) y níquel (Ni). El gadolinio (Gd), un elemento de las tierras raras, también es ferromagnético por debajo de 16°C, pero tiene poca aplicación industrial.

Las propiedades ferromagnéticas de los elementos de transición Fe, Co y Ni se deben a la forma en que se alinean los espines de los electrones internos no apareados en sus redes cristalinas. Las capas interiores de los átomos individuales se llenan con pares de electrones con espines opuestos, y por ello no contribuyen a los momentos de dipolo magnético resultantes. En los sólidos, los electrones de valencia exteriores de los átomos se combinan entre sí para formar enlaces químicos, y en virtud de ellos, no hay un momento magnético importante debido a estos electrones. En Fe, Co y Ni los electrones 3*d* interiores no apareados son responsables del ferromagnetismo que estos elementos exhiben. El átomo de hierro tiene cuatro electrones 3*d* no apareados, el átomo de cobalto tres y el de níquel dos (figura 16.6).

En una muestra sólida de Fe, Co o Ni a temperatura ambiente, los espines de los electrones 3*d* de átomos adyacentes se alinean en una dirección paralela por medio de un fenómeno denominado *magnetización espontánea*. Este alineamiento paralelo de dipolos magnéticos atómicos ocurre sólo en regiones microscópicas llamadas *dominios magnéticos*. Si los dominios se orientan al azar, entonces no habrá magnetización neta dentro de la muestra. El alineamiento paralelo de los dipolos magnéticos de átomos de Fe, Co y Ni se debe a la creación de una energía de intercambio positiva entre ellos. Para que este alineamiento paralelo ocurra, el cociente entre el espaciamiento atómico y el diámetro de la órbita 3*d* debe estar en el intervalo de aproximadamente 1.4. a 2.7 (figura 16.7). De esta manera, el Fe, Co y Ni son ferromagnéticos, pero el manganeso (Mn) y el cromo (Cr) no lo son.

Electrones 3*d* no apareados	Átomo	Número de electrones	Orbitales 3*d* de la configuración electrónica	electrones 4*s*
3	V	23	↑↓ ↑ ↑	2
5	Cr	24	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	1
5	Mn	25	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	2
4	Fe	26	↑↓ ↑ ↑ ↑ ↑	2
3	Co	27	↑↓ ↑↓ ↑ ↑ ↑	2
2	Ni	28	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑ ↑	2
0	Cu	29	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	1

Figura 16.6
Momentos magnéticos de átomos neutros de elementos de transición 3*d*.

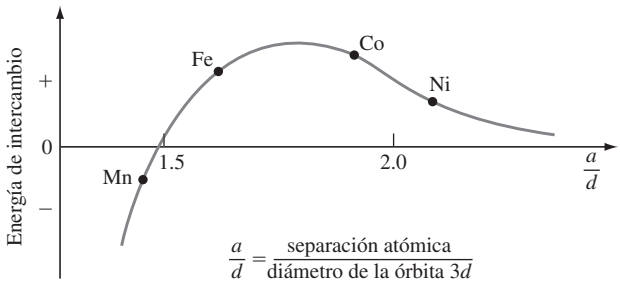


Figura 16.7
Energía de interacción de intercambio magnético como una función del cociente entre el espaciamiento atómico y el diámetro de la órbita 3*d* para algunos elementos de transición 3*d*. Aquellos elementos que tienen energías de intercambio positivas son ferromagnéticos; aquellos con energías de intercambio negativas son antiferromagnéticos

16.3.4 Momento magnético de un electrón del átomo no apareado

Cada electrón que gira sobre su propio eje (figura 16.5) se comporta como un dipolo magnético y tiene un momento de dipolo denominado **magnetón de Bohr** m_B. Este momento de dipolo tiene un valor de

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m} \tag{16.8}$$

donde e = carga electrónica, h = constante de Planck y m = masa de electrón. En unidades del SI $\mu_B = 9.27 \times 10^{-24}\ \text{A} \cdot \text{m}^2$. En la mayoría de los casos, los electrones en los átomos están apareados, y por ello se cancelan los momentos magnéticos positivos y negativos. Sin embargo, los electrones no apareados en las capas electrónicas internas pueden tener pequeños momentos de dipolo positivos, como en el caso de los electrones 3*d* del Fe, Co y el Ni.

PROBLEMA DE EJEMPLO 16.1

Utilizando la relación $\mu_B = eh/4\pi m$, demuestre que el valor numérico del magnetón de Bohr es $9.27 \times 10^{-24}\ \text{A} \cdot \text{m}^2$.

■ Solución

$$\begin{aligned}\mu_B = \frac{eh}{4\pi m} &= \frac{(1.60 \times 10^{-19}\ \text{C})(6.63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s})}{4\pi(9.11 \times 10^{-31}\ \text{kg})} \\ &= 9.27 \times 10^{-24}\ \text{C} \cdot \text{J} \cdot \text{s/kg} \\ &= 9.27 \times 10^{-24}\ \text{A} \cdot \text{m}^2 \blacktriangleleft\end{aligned}$$

Las unidades son consistentes del modo siguiente:

$$\frac{\text{C} \cdot \text{J} \cdot \text{s}}{\text{kg}} = \frac{(\text{A} \cdot \text{s})(\text{N} \cdot \text{m})(\text{s})}{\text{kg}} = \frac{\text{A} \cdot \cancel{\text{s}}}{\cancel{\text{kg}}}\left(\frac{\cancel{\text{kg}} \cdot \text{m} \cdot \text{m}}{\cancel{\text{s}}^2}\right)(\cancel{\text{s}}) = \text{A} \cdot \text{m}^2$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 16.2

Calcule el valor teórico para la magnetización de saturación M_S en amperes por metros y la inducción de saturación B_S en teslas para hierro puro, suponiendo que todos los momentos magnéticos debidos a los cuatro electrones de Fe 3*d* no apareados se alinean en un campo magnético. Utilice la ecuación $B_s \approx \mu_0 M_s$ y suponga que $\mu_0 H$ puede ignorarse. El hierro puro tiene una celda unitaria BCC con una constante de red $a = 0.287$ nm.

■ Solución

Se supone que el momento magnético de un átomo de hierro es igual a 4 magnetones de Bohr. De este modo,

$$M_s = \left[\frac{\dfrac{\text{átomos}}{\text{celda unitaria}}}{\dfrac{(2.87 \times 10^{-10}\ \text{m})^3}{\text{celda unitaria}}}\right]\left(\frac{\text{4 magnetones de Bohr}}{\text{átomo}}\right)\left(\frac{9.27 \times 10^{-24}\ \text{A} \cdot \text{m}^2}{\text{magnetón de Bohr}}\right)$$

$$= \left(\frac{0.085 \times 10^{30}}{\text{m}^3}\right)(4)(9.27 \times 10^{-24}\ \text{A} \cdot \text{m}^2) = 3.15 \times 10^6\ \text{A/m} \blacktriangleleft$$

$$B_s \approx \mu_0 M_s \approx \left(\frac{4\pi \times 10^{-7}\ \text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}\right)\left(\frac{3.15 \times 10^6\ \text{A}}{\text{m}}\right) \approx 3.96\ \text{T} \blacktriangleleft$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 16.3

El hierro tiene una magnetización de saturación de 1.71×10^6 A/m. ¿Cuál es el número promedio de magnetones de Bohr por átomos que contribuye a esta magnetización? El hierro tiene una estructura cristalina BCC con $a = 0.287$ nm.

■ Solución

La magnetización de saturación M_s en amperes por metro se calcula de la ecuación 16.9 como

$$M_s = \left(\frac{\text{átomos}}{\text{m}^3}\right)\left(\frac{N\mu_\text{B}\ \text{de magnetones de Bohr}}{\text{átomo}}\right)\left(\frac{9.27 \times 10^{-24}\ \text{A} \cdot \text{m}^2}{\text{magnetón de Bohr}}\right)$$

$$= \text{resp. en A/m} \qquad \textbf{(16.9)}$$

$$\text{Densidad de átomos (núm. de átomos/m}^3) = \frac{2\ \text{átomos/celda unitaria BCC}}{(2.87 \times 10^{-10}\ \text{m})^3/\text{celda unitaria}}$$

$$= 8.46 \times 10^{28}\ \text{átomos/m}^3$$

Se reacomoda la ecuación 16.9 y se resuelve para $N\mu_B$. Después de sustituir valores para M_s, la densidad atómica, μ_B, es posible calcular el valor de $N\mu_B$.

$$N\mu_B = \frac{M_s}{(\text{átomos/m}^3)(\mu_B)}$$

$$= \frac{1.71 \times 10^6\ \text{A/m}}{(8.46 \times 10^{28}\ \text{átomos/m}^3)(9.27 \times 10^{-24}\ \text{A} \cdot \text{m}^2)} = 2.18\,\mu_B/\text{átomo} \blacktriangleleft$$

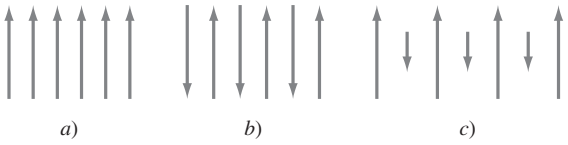


Figura 16.8
Alineación de dipolos magnéticos para diferentes tipos de magnetismo: *a*) ferromagnetismo, *b*) antiferromagnetismo y *c*) ferrimagnetismo.

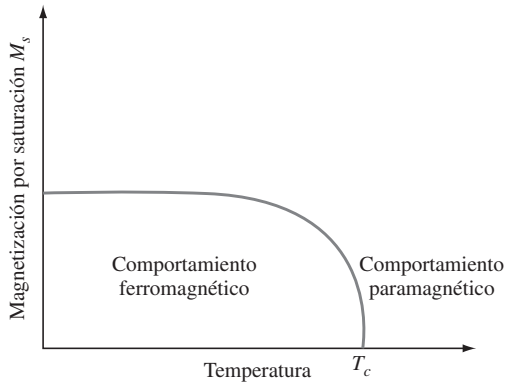


Figura 16.9
Efecto de la temperatura sobre la magnetización de saturación M_s de un material ferromagnético por debajo de su temperatura de Curie T_c. El aumento de la temperatura hace que los momentos magnéticos sean aleatorios.

16.3.5 Antiferromagnetismo

Otro tipo de magnetismo que ocurre en algunos materiales es el **antiferromagnetismo**. En la presencia de un campo magnético, los dipolos magnéticos de los átomos de materiales antiferromagnéticos se alinean por sí solos en direcciones opuestas (figura 16.8*b*). Los elementos manganeso y cromo en el estado sólido a temperatura ambiente exhiben antiferromagnetismo y tienen un intercambio de energía negativa debido a que el cociente entre su espaciamiento atómico y el diámetro de la órbita *3d* es menor que 1.5, aproximadamente (figura 16.7).

16.3.6 Ferrimagnetismo

En algunos materiales cerámicos, iones diferentes tienen distintas magnitudes para sus momentos magnéticos, y cuando estos momentos magnéticos se alinean de una manera antiparalela, hay un momento magnético neto en una dirección (**ferrimagnetismo**) (figura 16.8*c*). Como un grupo, los materiales ferrimagnéticos se denominan *ferritas*. Hay muchos otros tipos de ferritas. Un grupo se basa en la magnetita, Fe_3O_4, que es la piedra imán magnética de los antiguos. Las ferritas tienen bajas conductividades que las hacen útiles en muchas aplicaciones electrónicas.

16.4 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL FERROMAGNETISMO

A cualquier temperatura finita por arriba de 0 K, la energía térmica provoca que los dipolos magnéticos de un material ferromagnético se aparten de un alineamiento paralelo perfecto. Por ello, la energía de intercambio que ocasiona el alineamiento paralelo de los dipolos magnéticos en materiales ferromagnéticos es contrabalanceada por los efectos aleatorios de la energía térmica (figura 16.9). Por último, cuando aumenta

la temperatura, se alcanza cierto valor de la misma en la que el ferromagnetismo en un material ferromagnético desaparece por completo, y el material se vuelve paramagnético. Esta temperatura recibe el nombre de **temperatura de Curie**. Cuando una muestra de un material ferromagnético se enfría desde una temperatura mayor que su temperatura de Curie, los dominios ferromagnéticos se reforman y el material se vuelve otra vez ferromagnético. Las temperaturas de Curie del Fe, Co y Ni son, respectivamente, 770, 1 123 y 358°C.

16.5 DOMINIOS FERROMAGNÉTICOS

Debajo de la temperatura de Curie, los momentos de dipolo magnético de átomos de materiales ferromagnéticos tienden a alinearse por sí solos en una dirección paralela en regiones de pequeño volumen llamadas **dominios magnéticos**. Cuando un material ferromagnético como el hierro o el níquel se desmagnetiza mediante enfriamiento lento desde arriba de su temperatura de Curie, los dominios magnéticos se alinean al azar de manera que no hay momento magnético neto para una muestra (figura 16.10).

Cuando un campo magnético externo se aplica a un material ferromagnético desmagnetizado, los dominios magnéticos cuyos momentos están inicialmente en paralelo al campo magnético aplicado, crecen a costa de los dominios orientados menos favorablemente (figura 16.11). El crecimiento de los dominios ocurre mediante el movimiento de la pared del dominio, como se indica en la figura 16.11, y B o M au-

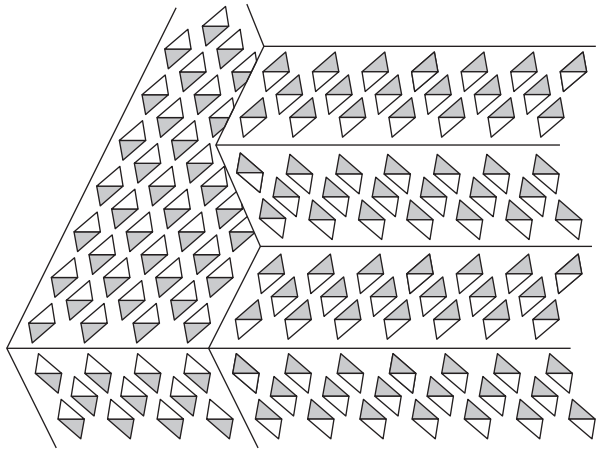


Figura 16.10
Ilustración esquemática de dominios magnéticos en un metal ferromagnético. Todos los dipolos magnéticos en cada dominio están alineados, aunque los dominios mismos se alinean al azar de manera que no hay magnetización neta.
(Tomado de R. M. Rose, L. A. Shepard, y J. Wulff, "Structure and Properties of Materials", vol. IV: "Electronic Properties", Wiley, 1966, p. 193.)

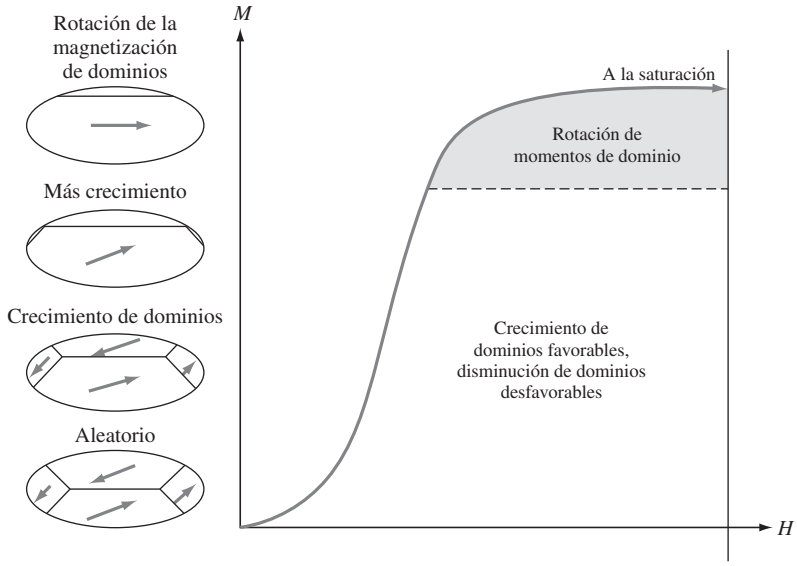


Figura 16.11
Crecimiento y rotación de dominios magnéticos cuando se magnetiza un material ferromagnético desmagnetizado hasta la saturación mediante un campo magnético aplicado.
(Tomado de R. M. Rose, L. A. Shepard, y J. Wulff, "Structure and Properties of Materials", vol. IV: "Electronic Properties", Wiley, 1966, p. 193.)

mentan con rapidez cuando crece el campo magnético H. El crecimiento de dominios por el movimiento de paredes se produce primero puesto que este proceso requiere menos energía que la rotación de dominios. Cuando termina el crecimiento de dominios, si el campo aplicado aumenta de manera sustancial, ocurre la rotación de dominios. La rotación de dominios requiere considerablemente más energía que el crecimiento de dominios, y la pendiente de las curvas B o M en función de H disminuye en los campos elevados que se requieren para la rotación de dominios (figura 16.11). Cuando se elimina el campo aplicado, la muestra magnetizada permanece magnetizada, aun cuando parte de la magnetización se pierde debido a la tendencia de los dominios a rotar de nuevo a su alineamiento original.

En la figura 16.12 se muestra cómo las paredes del dominio se mueven por el efecto de un campo aplicado en monocristales de hierro. Las paredes de los dominios se revelan mediante la técnica de Bitter, en la cual una solución coloidal de óxido de hierro se deposita sobre la superficie pulida de hierro. El movimiento de la pared se observa con un microscopio óptico. Mediante esta técnica, se ha obtenido mucha información acerca del movimiento de las paredes del dominio bajo campos magnéticos aplicados.

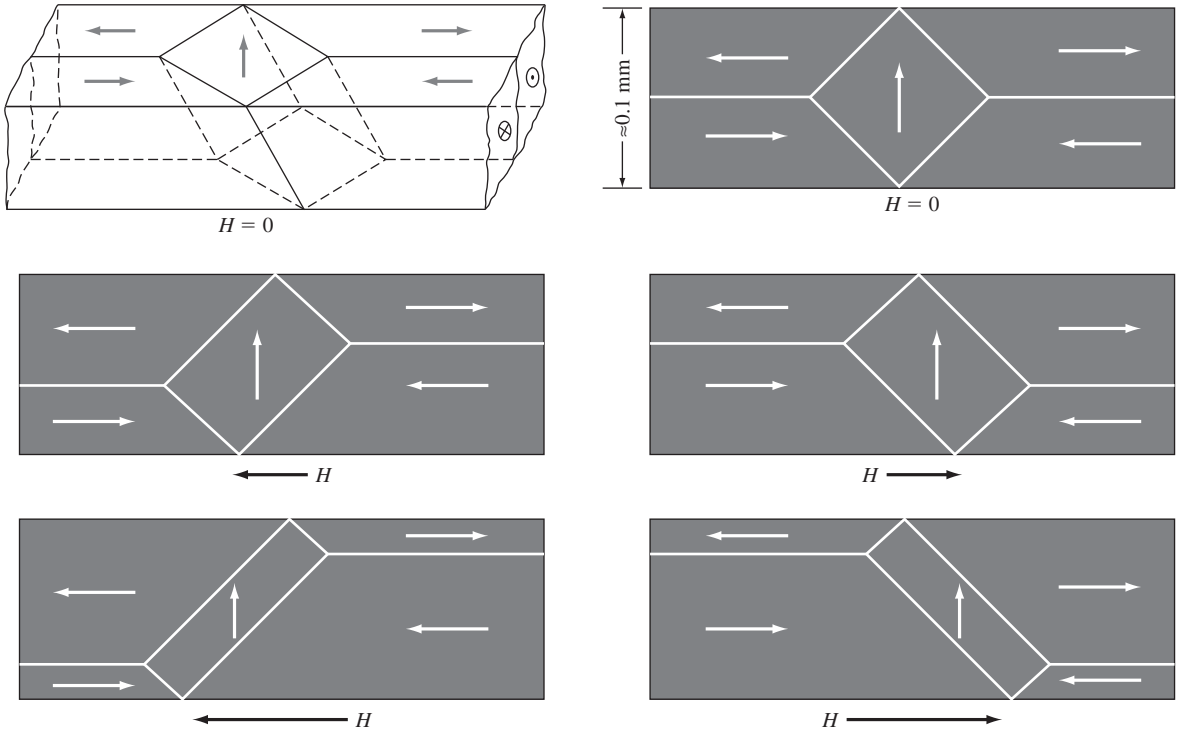


Figura 16.12
Movimiento de fronteras de dominios en un cristal de hierro por efecto de la aplicación de un campo magnético. Adviértase que cuando aumenta el campo aplicado, se agrandan los dominios con los dipolos alineados en la dirección del campo y aquellos con sus dipolos opuestos se vuelven más pequeños. (Los campos aplicados en las figuras de la izquierda y de la derecha aumentan de arriba a abajo.)
(Cortesía de R. W. DeBlois, The General Electric Co., y C. D. Graham, Universidad de Pennsylvania.)

16.6 TIPOS DE ENERGÍAS QUE DETERMINAN LA ESTRUCTURA DE DOMINIOS FERROMAGNÉTICOS

La estructura de dominios de un material ferromagnético se determina mediante muchos tipos de energías, donde la estructura más estable se alcanza cuando es mínima la energía potencial total del material. La energía magnética total de un material ferromagnético es la suma de las contribuciones de las siguientes energías: 1) energía de intercambio, 2) energía magnetoestática, 3) energía anisotrópica magnetocristalina, 4) energía de la pared del dominio y 5) energía magnetoestrictiva. Se discutirán de manera breve cada una de estas energías.

16.6.1 Energía de intercambio

La energía potencial *dentro* de un dominio de un sólido ferromagnético se minimiza cuando todos sus dipolos magnéticos se alinean en una dirección **(intercambio de**

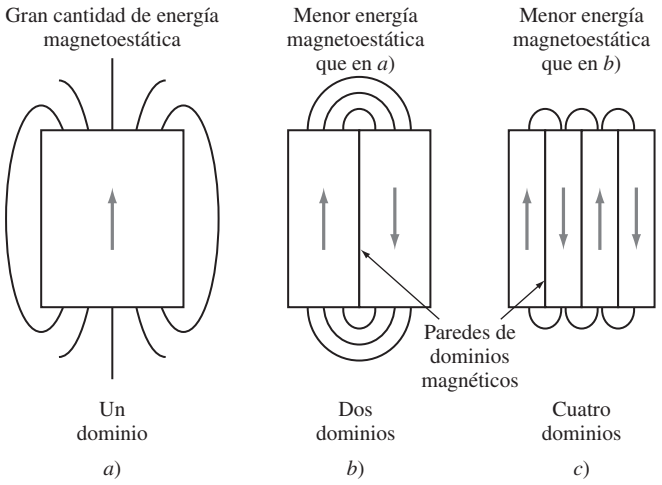


Figura 16.13
Ilustración esquemática que muestra cómo la reducción del tamaño de dominios en un material magnético disminuye la energía magnetoestática al reducir el campo magnético externo. *a*) Un dominio, *b*) dos dominios y *c*) cuatro dominios.

energía). Este alineamiento se asocia con una energía de intercambio positiva. Sin embargo, aun cuando la energía potencial dentro de un dominio se minimiza, su energía potencial externa se incrementa mediante la formación de un campo magnético externo (figura 16.13*a*).

16.6.2 Energía magnetoestática

La **energía magnetoestática** es la energía magnética potencial de un material ferromagnético producida por su campo externo (figura 16.13*a*). Esta energía potencial puede minimizarse en un material ferromagnético mediante la formación de dominios, como se ilustra en la figura 16.13. Para un volumen unitario de un material ferromagnético, una estructura de un dominio tiene la energía potencial más alta, como se indica en la figura 16.13*a*. Dividiendo el dominio de la figura 16.13*a* en dos dominios (figura 16.13*b*), la intensidad y el grado del campo magnético externo se reducen. Mediante la subdivisión adicional del dominio en cuatro dominios, el campo magnético externo se reduce aún más (figura 16.13*c*). Puesto que la intensidad del campo magnético externo de un material ferromagnético está directamente relacionada con su energía magnetoestática, la formación de dominios múltiples reduce la energía magnetoestática del volumen unitario del material.

16.6.3 Energía de anisotropía magnetocristalina

Antes de considerar la energía de la frontera (pared) del dominio, se tratarán los efectos de la orientación de cristal en la magnetización de materiales ferromagnéticos. Las curvas de magnetización en función del campo aplicado para un cristal de un material

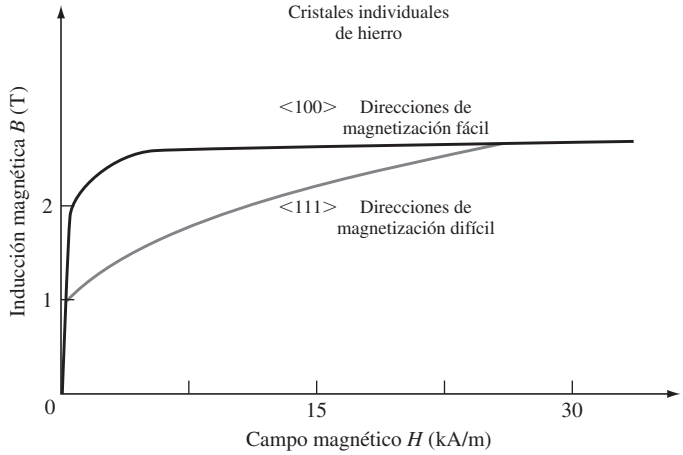


Figura 16.14
Anisotropía magnetocristalina en hierro BCC. El hierro se magnetiza con mayor facilidad en las direcciones ⟨100⟩ que en las direcciones ⟨111⟩.

ferromagnético pueden variar, dependiendo de la orientación del cristal relativa al campo aplicado. En la figura 16.14 se muestran las curvas de inducción magnética B en función del campo aplicado H para magnetizaciones en las direcciones ⟨100⟩ y ⟨111⟩ de cristales individuales de hierro BCC. Como se indica en la figura 16.14, la magnetización de la saturación ocurre con mayor facilidad (o con el campo aplicado más bajo) en las direcciones de ⟨100⟩ y con el campo aplicado más alto en las direcciones de ⟨111⟩. Se dice que las direcciones de ⟨111⟩ son las direcciones duras de la magnetización en hierro BCC. Para níquel FCC las direcciones fáciles de magnetización son la ⟨111⟩, en tanto que la ⟨100⟩ corresponde a las direcciones duras; estas últimas para el níquel FCC son justo el opuesto de las del hierro BCC.

Para materiales ferromagnéticos policristalinos como el hierro y el níquel, los granos en diferentes orientaciones llegarán a la magnetización por saturación a diferentes intensidades de campo. Los granos cuyas orientaciones están en la dirección de magnetización fácil se saturarán a bajos campos aplicados, mientras que los granos orientados en las direcciones duras deben rotar su momento resultante en la dirección del campo aplicado y así alcanzarán la saturación bajo campos mucho más altos. El trabajo hecho para rotar todos los dominios debido a esta anisotropía se conoce como **energía de anisotropía magnetocristalina**.

16.6.4 Energía de la pared del dominio

Una *pared del dominio* es la frontera entre dos dominios cuyos momentos magnéticos totales están en diferentes orientaciones. Es análoga a una frontera de grano en la que la orientación de cristal cambia de un grano a otro. En contraste con el límite de grano, en el cual los granos cambian de orientación de manera abrupta y que es de casi tres átomos de ancho, un dominio cambia de orientación de manera gradual con una

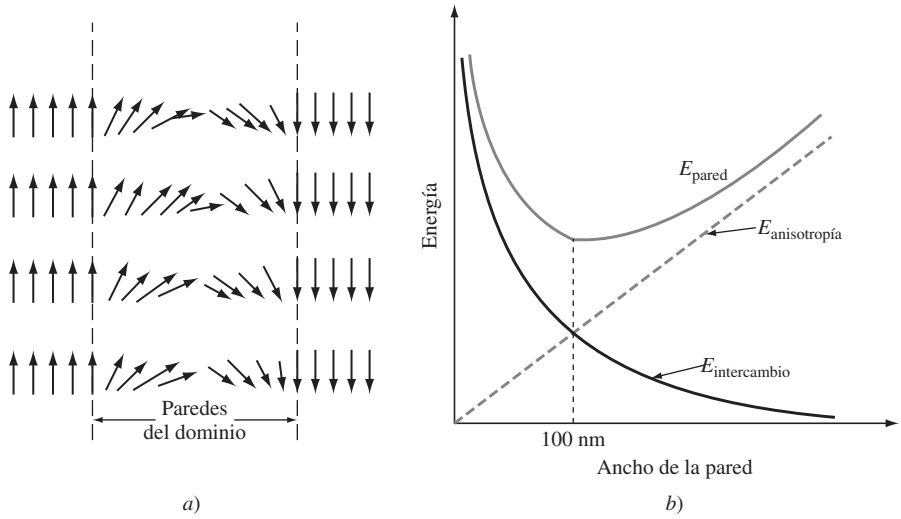


Figura 16.15
Ilustración esquemática de *a*) arreglos de dipolos magnéticos en paredes de dominio (Bloch) y *b*) relación entre la energía de intercambio magnético, la energía de anisotropía magnetocristalina y el ancho de la pared. El ancho de equilibrio de la pared es alrededor de 100 nm.
(Adaptado de C. S. Barrett, W. D. Nix, y A. S. Tetelman, "Principles of Engineering Materials", Prentice-Hall, 1973, p. 485.)

frontera de dominio que es casi de 300 átomos de ancho. En la figura 16.15*a* se muestra el dibujo esquemático de una frontera de dominio con un cambio de 180 grados en la dirección del momento magnético que se presenta de manera gradual a través de la frontera.

El gran ancho de una pared de dominio se debe al balance entre dos fuerzas: la energía de intercambio y la anisotropía magnetocristalina. Cuando sólo hay una pequeña diferencia en orientación entre los dipolos (figura 16.15*a*), las fuerzas de intercambio entre los dipolos se minimizan y la energía de intercambio se reduce (figura 16.15*b*). De este modo, las fuerzas de intercambio tenderán a ensanchar la pared del dominio. Sin embargo, cuanto más ancha es la pared, tanto mayor será el número de dipolos obligados a mantenerse en direcciones diferentes a las de los de magnetización fácil, y se incrementará la energía de anisotropía magnetocristalina (figura 16.15*b*). De este modo, el ancho de la pared de equilibrio se alcanzará en el ancho donde la suma de las energías de intercambio y de anisotropía magnetocristalina es un mínimo (figura 16.15*b*).

16.6.5 Energía magnetoestrictiva

Cuando se magnetiza un material ferromagnético, sus dimensiones cambian un poco, y la muestra que se magnetiza se expande o contrae en la dirección de magnetización (figura 16.16). Este esfuerzo elástico reversible inducido de manera magnética ($\Delta l/l$) se denomina **magnetoestricción** y es del orden de 10^{-6}. La energía debida a los es-

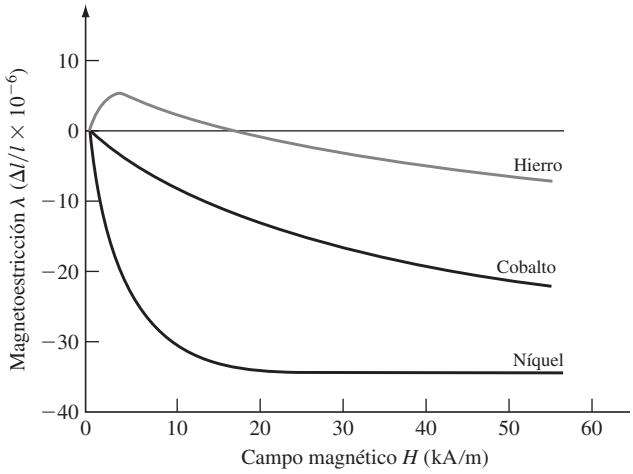


Figura 16.16
Comportamiento magnetoestrictivo de los elementos ferromagnéticos Fe, Co y Ni. La magnetoestricción es una elongación fraccionaria (o contracción); en esta ilustración está en unidades de micrómetros por metro.

fuerzos mecánicos creados por la magnetoestricción se denomina **energía magnetoestrictiva**. Para el hierro, la magnetoestricción es positiva a valores de campos bajos, y negativa a valores elevados (figura 16.16).

La causa de la magnetoestricción se atribuye al cambio en la longitud de enlace entre los átomos en metal ferromagnético cuando sus momentos de dipolo-espín se rotan hacia el alineamiento durante la magnetización. Los campos de los dipolos pueden atraerse o repelerse entre sí, lo que lleva a la contracción o expansión del metal durante la magnetización.

Se considerará ahora el efecto de la magnetoestricción en la configuración de equilibrio de la estructura del dominio de materiales cristalinos cúbicos, tales como los que se ilustran en la figura 16.17*a* y *b*. Por la simetría cúbica de los cristales, la formación de dominios en forma triangular, denominados *dominios de cerradura*, en los extremos del cristal se elimina la energía magnetoestática asociada con un campo magnético externo y, en consecuencia, reduce la energía del material. Podría parecer que los dominios muy grandes como los que se indican en la figura 16.17*a* y *b* serían la configuración de energía más baja y más estable puesto que hay energía de pared mínima. Sin embargo, éste no es el caso pues los esfuerzos magnetoestrictivos introducidos durante la magnetización tienden a ser mayores para dominios más grandes. Los dominios magnéticos más pequeños, como los que se muestran en la figura 16.17*c*, reducen los esfuerzos magnetoestrictivos pero incrementan el área de la pared del dominio y la energía. De este modo, la configuración del dominio de equilibrio se alcanza cuando la suma de las energías magnetoestrictivas y de **pared del dominio** es un mínimo.

En resumen, la estructura del dominio formada en materiales ferromagnéticos se determina mediante las diversas contribuciones de energías de intercambio, magnetoestática, anisotrópica magnetocristalina, pared del dominio y magnetoestrictiva a su

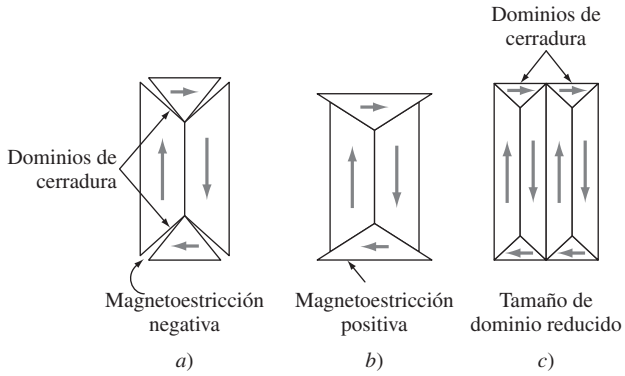


Figura 16.17
Magnetoestricción en materiales magnéticos cúbicos. Exageración esquemática de magnetoestricción *a*) negativa y *b*) positiva que aparta las fronteras del dominio de un material magnético. *c*) Reducción de los esfuerzos magnetoestrictivos mediante la creación de una estructura de tamaño de dominio más pequeño.

energía magnética total. La configuración de equilibrio más estable ocurre cuando la energía magnética total es la más baja.

16.7 LA MAGNETIZACIÓN Y DESMAGNETIZACIÓN DE UN METAL FERROMAGNETICO

Los metales ferromagnéticos como el Fe, Co y Ni adquieren grandes magnetizaciones cuando se colocan en un campo magnetizante, y permanecen en la condición magnetizada a un menor grado después de que se suprime el campo de magnetización. Se considerará el efecto de un campo aplicado H sobre la inducción magnética B de un metal ferromagnético durante la magnetización y desmagnetización, como se muestra en la gráfica de B en función de H de la figura 16.18. Primero, se desmagnetiza un metal ferromagnético como el hierro, enfriándolo de manera lenta desde un valor superior al de su temperatura de Curie. Después, se aplica un campo magnetizante a la muestra y se sigue el efecto del campo aplicado sobre la inducción magnética de la fuente.

Cuando el campo aplicado aumenta desde cero, B crece desde cero a lo largo de la curva OA de la figura 16.18 hasta que la **inducción por saturación** se alcanza en el punto A. Después de reducir el campo aplicado hasta cero, la curva de magnetización original ya no se vuelve a trazar, y ahí permanece una densidad de flujo magnético conocida como **inducción remanente** $\boldsymbol{B_r}$ (punto C en la figura 16.18). Para disminuir la inducción magnética hasta cero, debe aplicarse un campo inverso (negativo) de la cantidad H_c, que recibe el nombre de **fuerza coercitiva** (punto D en la figura 16.18). Si el campo aplicado negativo se aumenta todavía más, a la larga el material alcanzará la

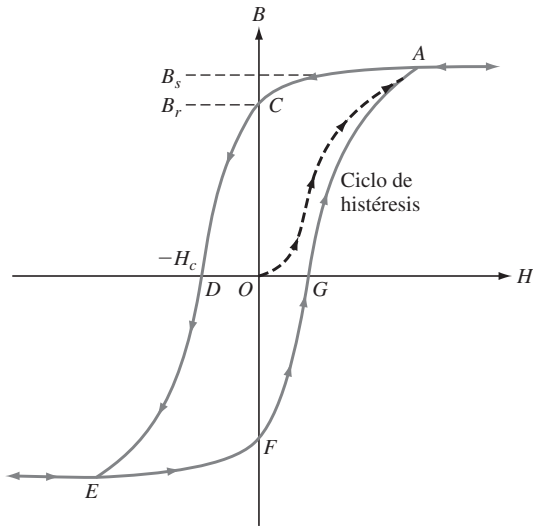


Figura 16.18
Ciclo de histéresis de la inducción magnética *B* en función del campo aplicado *H* para un material ferromagnético. La curva *OA* traza la relación inicial de *B* en función de *H* para la magnetización de una muestra desmagnetizada. La magnetización y la desmagnetización cíclicas hasta la inducción de saturación trazan el ciclo de histéresis *ACDEFGA*.

inducción por saturación en el campo inverso en el punto *E* de la figura 16.18. Cuando se suprime el campo inverso, la inducción magnética volverá a la inducción remanente en el punto *F* en la figura 16.18, y luego de la aplicación de un campo aplicado positivo, la curva *B-H* continuará el trayecto *FGA* para completar un circuito. Una aplicación adicional de los campos aplicados inverso y directo para la inducción por saturación, producirá el ciclo repetitivo de *ACDEFGA*. Este circuito de magnetización se conoce como **ciclo de histéresis**, y su área interna es una medida de la energía perdida por el trabajo realizado por medio del ciclo de magnetización y desmagnetización.

16.8 MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS

Un **material magnético blando** se magnetiza y desmagnetiza con facilidad, mientras que un *material magnético duro* es difícil de magnetizar y desmagnetizar. En un principio, los materiales magnéticos blandos y duros eran físicamente blandos y duros. En la actualidad, sin embargo, la dureza física de un material magnético no indica necesariamente si es magnéticamente blando o duro.

Los materiales blandos como las aleaciones de hierro con 3 a 4 por ciento de silicio que se utilizan en los núcleos de transformadores, motores y generadores tienen ciclos de histéresis reducidos con bajas fuerzas coercitivas (figura 16.19*a*). Por otro lado, los materiales magnéticos utilizados en los imanes permanentes tienen ciclos de histéresis anchos con fuerzas coercitivas altas (figura 16.19*b*).

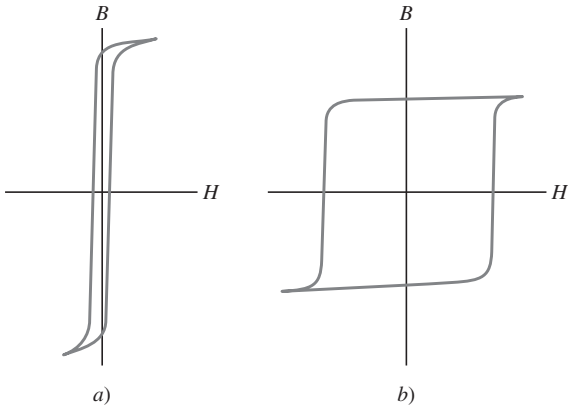


Figura 16.19
Ciclos de histéresis para *a*) un material magnético blando y *b*) un material magnético duro. El material magnético blando tiene un ciclo de histéresis estrecho que facilita magnetizarlo y desmagnetizarlo, en tanto que el material magnético duro tiene un ciclo de histéresis que dificulta magnetizarlo y desmagnetizarlo.

16.8.1 Propiedades deseables de materiales magnéticos blandos

Para que un material ferromagnético sea blando, su ciclo de histéresis debe tener la más baja fuerza coercitiva posible. Esto es, su ciclo de histéresis debe ser lo más delgado posible de manera que el material se magnetice con facilidad y tenga una elevada permeabilidad magnética. En la mayoría de las aplicaciones, una alta inducción de saturación también es una propiedad importante de los materiales magnéticos blandos. En consecuencia, es deseable un ciclo de histéresis muy delgado y alto para la mayoría de los materiales magnéticos blandos (figura 16.19*a*).

16.8.2 Pérdidas de energía para materiales magnéticos blandos

Pérdidas de energía por histéresis Las **pérdidas de energía por histéresis** se deben a la energía disipada que se requiere para empujar los dominios hacia adelante y hacia atrás durante la magnetización y la desmagnetización del material magnético. La presencia de impurezas, imperfecciones cristalinas y precipitados en materiales magnéticos blandos actúan en su totalidad como barreras para impedir el movimiento de las paredes de dominio durante el ciclo de magnetización y de ese modo incrementar las pérdidas de energía por histéresis. Los esfuerzos plásticos, al incrementar la densidad de dislocaciones de un material magnético, también aumentan las pérdidas por histéresis. En general, el área interna de un ciclo de histéresis es una medida de la energía que se pierde debido a la histéresis magnética.

En el núcleo magnético de un transformador de potencia eléctrica de CA que usa 60 ciclos/s, la corriente eléctrica recorre el ciclo de histéresis completo 60 veces por segundo, y en cada ciclo hay algo de energía perdida debido al movimiento de las paredes del dominio del material magnético en el núcleo del transformador. De este modo, el aumento de la frecuencia de entrada eléctrica de CA de los dispositivos electromagnéticos incrementa las pérdidas de energía por histéresis.

Pérdidas de energía por corrientes parásitas Un campo magnético variable que resulta de la entrada eléctrica de CA a un núcleo magnético conductor produce gradientes de voltaje transitorios que crean corrientes eléctricas desviadas. Estas corrientes eléctricas inducidas reciben el nombre de *corrientes parásitas* y son una fuente de pérdidas de energía debido al calentamiento por resistencia eléctrica. Las **pérdidas de energía por corrientes parásitas** en los transformadores eléctricos pueden reducirse utilizando una estructura laminada o de hojas en el núcleo magnético. Una capa aislante entre el material magnético conductor evita que las corrientes parásitas pasen de una lámina a la siguiente. Otro procedimiento para reducir las pérdidas por corrientes parásitas, en particular a frecuencias altas, consiste en usar un material magnético blando que es un aislador. Los óxidos ferrimagnéticos y otros materiales magnéticos de tipo similar se emplean en algunas aplicaciones electromagnéticas de alta frecuencia, y se discutirán en la sección 16.9.

16.8.3 Aleaciones de hierro-silicio

Los materiales magnéticos blandos que se usan de manera más amplia son las aleaciones de hierro con 3 a 4 por ciento de silicio. Antes de 1900, se usaron aceros al bajo y medio carbón en dispositivos de aplicaciones eléctricas de baja frecuencia (60 ciclos) como transformadores, motores y generadores. Sin embargo, con estos materiales magnéticos, las pérdidas del núcleo resultaron relativamente altas. Agregar alrededor de 3 a 4 por ciento de silicio al hierro para formar **aleaciones de hierro-silicio** tiene varios efectos benéficos en la reducción de las pérdidas del núcleo en materiales magnéticos:

1. El silicio aumenta la resistividad eléctrica del acero al bajo carbón y reduce de este modo las pérdidas por corrientes parásitas.

2. El silicio disminuye la energía de magnetoanisotropía del hierro e incrementa la permeabilidad magnética, y por ello disminuye las pérdidas en el núcleo por histéresis.

3. Las adiciones de silicio (de 3 a 4 por ciento) disminuyen también la magnetoestricción y reducen las pérdidas de energía por histéresis, así como el ruido del transformador (“zumbido”).

Sin embargo, respecto a las desventajas, el silicio disminuye la ductilidad del hierro, por lo que sólo puede alearse con éste alrededor de 4 por ciento de silicio. Este último también disminuye la inducción por saturación y la temperatura de Curie del hierro.

Una disminución adicional en las pérdidas de energía por corrientes parásitas en los núcleos de transformador se logró utilizando una estructura laminada (hojas apiladas). En un núcleo de transformador eléctrico moderno, se apila una multitud de placas delgadas de hierro-silicio de aproximadamente 0.010 a 0.014 pulgadas (0.025 a 0.035 cm) de espesor, una encima de la otra con una delgada capa de aislante entre ellas. El material aislante se recubre en ambos lados de las placas de hierro-silicio y evita que las corrientes parásitas desviadas fluyan perpendicularmente a las placas.

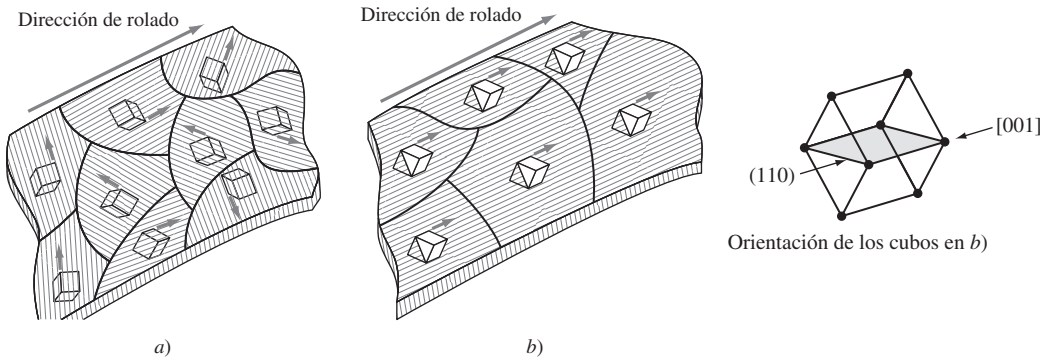


Figura 16.20
Textura (110) [001] de orientación *a*) aleatorio y *b*) preferencial en una placa de hierro policristalino de 3 a 4% de silicio. Los cubos pequeños indican la orientación de cada grano. *(Tomado de R. M. Rose, L. A. Shepard, y J. Wulff, "Structure and Properties of Materials", vol. IV: "Electronic Properties", Wiley, 1966, p. 211.)*

Tabla 16.3 Propiedades magnéticas de materiales magnéticos suaves seleccionadas

Material y composición	Inducción por saturación B_s (T)	Fuerza coercitiva H_c (A/cm)	Permeabilidad relativa inicial μ_i
Hierro magnético, placa de 0.2 cm	2.15	0.88	250
SI/Fe (rolado en frío M36 (aleatorio)	2.04	0.36	500
M6 (110) [001], 3.2% SI/Fe (orientado)	2.03	0.06	1 500
45 Ni-55 Fe (Permaloy 45)	1.6	0.024	2 700
75 Ni-5 Cu-2 Cr-18 Fe (Mumetal)	0.8	0.012	30 000
79 Ni-5 Mo-15 Fe-0.5 Mn (Supermaloy)	0.78	0.004	100 000
48% MnO-Fe_2O_3, 52% ZnO-Fe_2O_3 (Ferrita suave)	0.36		1 000
36% NiO-Fe_2O_3, 64% ZnO-Fe_2O_3 (Ferrita suave)	0.29		650

Fuente: G. Y. Chin y J. H. Wernick, "Magnetic Materiales, Bulk," vol. 14: *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 3a. ed., Wiley, 1981, p. 686.

Incluso se logró otra disminución en las pérdidas de energía en el núcleo de transformadores en la década de 1940 mediante la producción de placa de hierro-silicio de grano orientado. Utilizando una combinación de trabajo en frío y tratamientos de recristalización, se produjo un material de grano orientado *cúbico (*COE*)* $\{110\}\langle001\rangle$ a escala industrial para placa de Fe con 3% de Si (figura 16.20). Puesto que la dirección [001] es un eje fácil para la magnetización de aleaciones de Fe con 3% de Si, los dominios magnéticos en los materiales COE se orientan para fácil magnetización luego de aplicar un campo en la dirección paralela a la del rodado de la lámina. En consecuencia, el material COE tiene una permeabilidad más alta y pérdidas por histéresis inferiores a las de la placa de Fe-Si con una textura aleatoria (tabla 16.3).

16.8.4 Vidrios metálicos

Los vidrios metálicos son una clase relativamente nueva de materiales tipo metálico cuya característica principal es una estructura no cristalina a diferencia de las aleacio-

Tabla 16.4 Vidrios metálicos: composiciones, propiedades y aplicaciones

Aleación (atómica %)	Inducción por saturación B_s (T)	Permeabilidad máxima	Aplicaciones
$Fe_{78}B_{13}Si_9$	1.56	600 000	Transformadores eléctricos, bajas pérdidas en el núcleo
$Fe_{81}B_{13.5}Si_{3.5}C_2$	1.61	300 000	Transformadores de pulsos, interruptores magnéticos
$Fe_{67}Co_{18}B_{14}Si_1$	1.80	4 000 000	Transformadores de pulsos, interruptores magnéticos
$Fe_{77}Cr_2B_{16}Si_5$	1.41	35 000	Transformadores de corriente, núcleos de sensado
$Fe_{74}Ni_4Mo_3B_{17}Si_2$	1.28	100 000	Bajas pérdidas en el núcleo a altas frecuencias
$Co_{69}Fe_4Ni_1Mo_2B_{12}Si_{12}$	0.70	600 000	Sensores magnéticos, cabezas de grabación
$Co_{66}Fe_4Ni_1B_{14}Si_{15}$	0.55	1,000 000	Sensores magnéticos, cabezas de grabación
$Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{18}$	0.88	800 000	Sensores magnéticos, cabezas de grabación

Fuente: Metglas Magnetic Alloys, Allied Metglas Products.

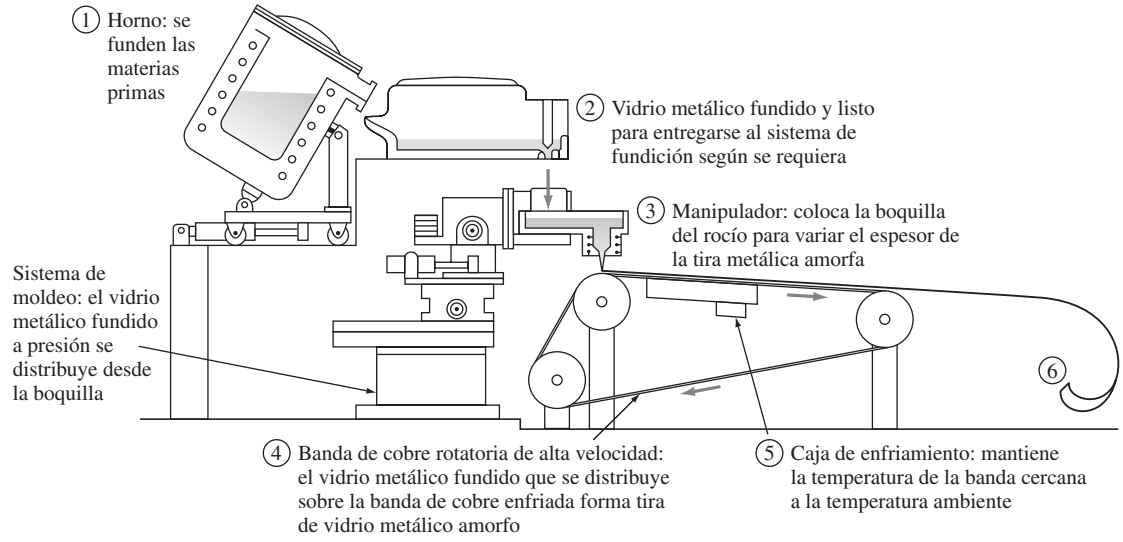
nes metálicas normales, las cuales tienen una estructura cristalina. Los átomos en metales y aleaciones normales cuando se enfrían desde el estado líquido se arreglan por sí solos en una red cristalina ordenada. En la tabla 16.4 se enlistan las composiciones atómicas de ocho vidrios metálicos de importancia para la ingeniería. Estos materiales tienen propiedades magnéticas blandas importantes y consisten esencialmente en diversas combinaciones de Fe, Co y Ni ferromagnéticos con los metaloides B y Si. Las aplicaciones para estos materiales magnéticos excepcionalmente blandos incluyen transformadores eléctricos de pérdidas en el núcleo de baja energía, sensores magnéticos y cabezas de grabación.

Los vidrios metálicos se producen por medio de un rápido proceso de solidificación en el que el vidrio metálico fundido se enfría de manera muy rápida (alrededor de 10^{6}°C/s) como una película delgada sobre un molde rotatorio con superficie de cobre (figura 16.21*a*). Este proceso produce una tira continua de vidrio metálico de alrededor de 0.001 pulgadas (0.0025 cm) de espesor y de 6 pulgadas (15 cm) de ancho.

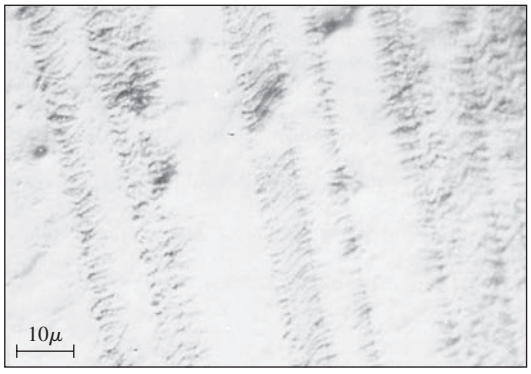
Los vidrios metálicos tienen algunas propiedades sobresalientes. Son muy fuertes (hasta 650 ksi [4 500 MPa]), muy duros con cierta flexibilidad y muy resistentes a la corrosión. Los vidrios metálicos que se enlistan en la tabla 16.4 son magnéticamente muy blandos, como se indica mediante sus permeabilidades máximas. De este modo, es posible magnetizarlos y desmagnetizarlos con mucha facilidad. Las paredes del dominio en estos materiales pueden moverse con facilidad excepcional, sobre todo porque no hay límites de grano ni anisotropía cristalina de largo alcance. En la figura 16.21*b* se muestran algunos dominios magnéticos en un vidrio metálico que se produjeron doblando la tira de vidrio metálico. Los vidrios metálicos magnéticamente blandos tienen ciclos de histéresis muy estrechos, como se indica en la figura 16.21*c*, y por ello presentan pérdidas de energía por histéresis muy bajas. Esta propiedad ha posibilitado el desarrollo de núcleos de transformador eléctrico de vidrio metálico de capas múltiples que tienen 70 por ciento de pérdidas en el núcleo, en comparación con los núcleos convencionales de hierro-silicio (figura 16.1). En la actualidad se realiza mucho trabajo de investigación y desarrollo en la aplicación de vidrios metálicos para transformadores eléctricos de bajas pérdidas.

16.8.5 Aleaciones de níquel-hierro

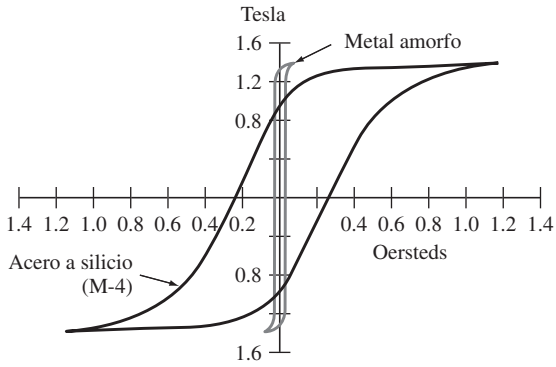
Las permeabilidades magnéticas de aleaciones comercialmente puras de hierro y hierro-silicio son relativamente bajas en campos aplicados bajos. La baja permeabilidad



a)



b)



c)

Figura 16.21

a) Dibujo esquemático de un proceso de solidificación rápido para la producción de tira de vidrio metálico.

(Tomado de New York Times, enero 11, 1989, p. D7.)

b) Dominios magnéticos inducidos en un vidrio metálico.

(Tomado de V. Lakshmanan y J. C. M. Li, Mater. Sci. Eng., 1988, p. 483.)

c) Comparación de los ciclos de histéresis de un vidrio metálico ferromagnético y de placa ferromagnética de hierro-silicio M-4.

(Electric World, septiembre de 1985.)

inicial no es tan importante en las aplicaciones eléctricas como en los núcleos de transformador, puesto que este equipo se opera con magnetizaciones elevadas. Sin embargo, en el caso de equipo de comunicaciones de alta sensibilidad utilizado para detectar o transmitir señales pequeñas, se usan de manera común las **aleaciones de níquel-hierro**, las cuales tienen permeabilidades mucho más altas en campos bajos.

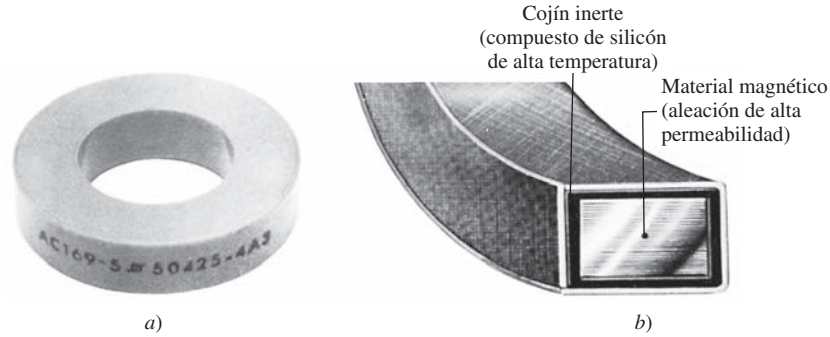


Figura 16.22
Núcleos magnéticos de cinta enrollada. *a*) Núcleo encapsulado. *b*) Sección transversal del núcleo de cinta enrollada con encapsulamiento fenólico. Adviértase que hay un cojín de hule de silicón entre la cinta de aleación magnética y el forro de encapsulamiento fenólico. Las propiedades magnéticas de las aleaciones de cinta enrollada de Ni-Fe altamente recocidas son sensibles al daño por deformación.
(Cortesía de Magnetics, a division of Spang & Company.)

En general, se producen en forma comercial dos clases de aleaciones de Ni-Fe, una con cerca de 50 por ciento de Ni y otra con alrededor de 79 por ciento de este elemento. Las propiedades magnéticas de algunas de estas aleaciones se presentan en la tabla 16.3. La aleación de 50 por ciento de Ni se caracteriza por una permeabilidad moderada ($\mu_i = 2\,500$; $\mu_{máx} = 25\,000$) y una alta inducción por saturación [$B_s = 1.6$ T (16 000 G)]. La aleación de 79 por ciento de Ni tiene alta permeabilidad ($\mu_i = 100\,000$; $\mu_{máx} = 1\,000\,000$) aunque una inducción por saturación inferior [$B_s = 0.8$ T (8 000 G)]. Estas aleaciones se emplean en transformadores de audio y de instrumento, relevadores de instrumento y en laminaciones para rotores y estatores. Los núcleos de cinta enrollada, tal como la sección recortada que se muestra en la figura 16.22, se usan de manera común en transformadores electrónicos.

Las aleaciones de Ni-Fe tienen tales permeabilidades elevadas porque sus energías de magnetoanisotropía y magnetoestrictiva son bajas en las composiciones que se utilizan. La permeabilidad inicial más alta en el sistema Ni-Fe ocurre a 78.5% de Ni con 21.5% de Fe, aunque es necesario un rápido enfriamiento por debajo de 600°C para suprimir la información de una estructura ordenada. La estructura ordenada de equilibrio en el sistema Ni-Fe tiene una celda unitaria FCC con átomos de Ni en las caras y átomos de Fe en las esquinas de las caras. La adición de alrededor de 5 por ciento de Mo a la aleación de 78.5 por ciento de Ni (Fe de equilibrio) también suprime la reacción ordenada, de manera que es suficiente el enfriamiento moderado de la reacción desde arriba de 600°C para prevenir el ordenamiento.

La permeabilidad inicial de las aleaciones de Ni-Fe que contiene alrededor de 56 a 58 por ciento de Ni puede aumentarse tres o cuatro veces recociendo la aleación en la presencia de un campo magnético después del recocido usual a elevada temperatura. El recocido magnético causa el ordenamiento direccional de los átomos de la retícula Ni-Fe y por ello aumenta la permeabilidad inicial de estas aleaciones. En la figura 16.23 se muestra el efecto del recocido magnético en el ciclo de histéresis de una aleación de 65% de Ni-35% de Fe.

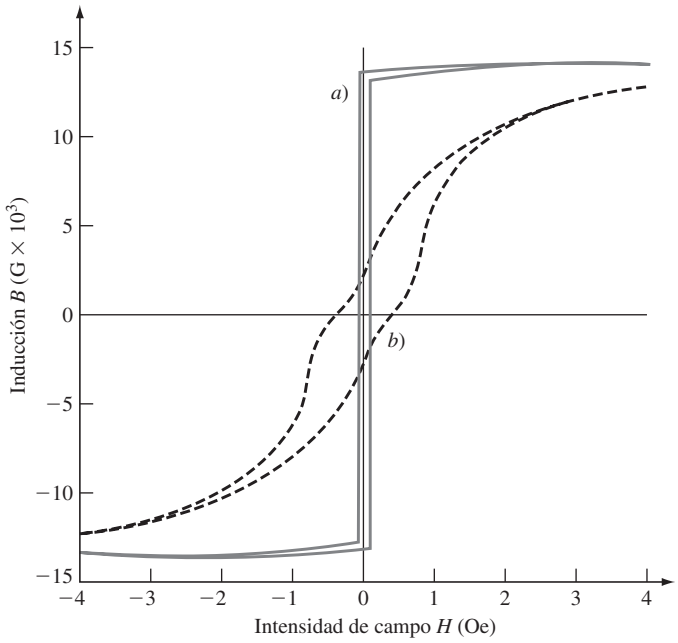


Figura 16.23
El efecto del recocido magnético en el lazo de histéresis de una aleación de 65% Ni-35% Fe. *a*) Permalloy 65 recocido con campo presente. *b*) Permalloy 65 recocido con campo ausente.
(Tomado de K. M. Bozorth, "Ferromagnetismo," Van Nostrand, 1951, p. 121.)

16.9 MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS

16.9.1 Propiedades de materiales magnéticos duros

Los **materiales magnéticos duros** o permanentes se caracterizan por una elevada fuerza coercitiva H_c y una alta inducción magnética remanente B_r, como se indica de manera esquemática en la figura 16.19*b*. De este modo, los ciclos de histéresis de materiales magnéticos duros son anchos y altos. Estos materiales se magnetizan en un campo magnético suficientemente intenso para orientar sus dominios magnéticos en la dirección del campo aplicado. Parte de la energía aplicada del campo se convierte en energía potencial, la cual se almacena en el imán permanente que se produce. Un imán permanente en la condición magnetizada total está entonces en un estado de energía relativamente alto cuando se compara con el imán desmagnetizado.

Los materiales magnéticos duros son difíciles de desmagnetizar una vez magnetizados. La curva de desmagnetización de un material magnético duro se elige como el segundo cuadrante de su ciclo de histéresis y puede utilizarse para comparar las resistencias de imanes permanentes. En la figura 16.24 se comparan las curvas de desmagnetización de diversos materiales magnéticos duros.

La potencia o energía externa de un material magnético permanente (duro) se relaciona directamente con el tamaño de su ciclo de histéresis. La energía potencial mag-

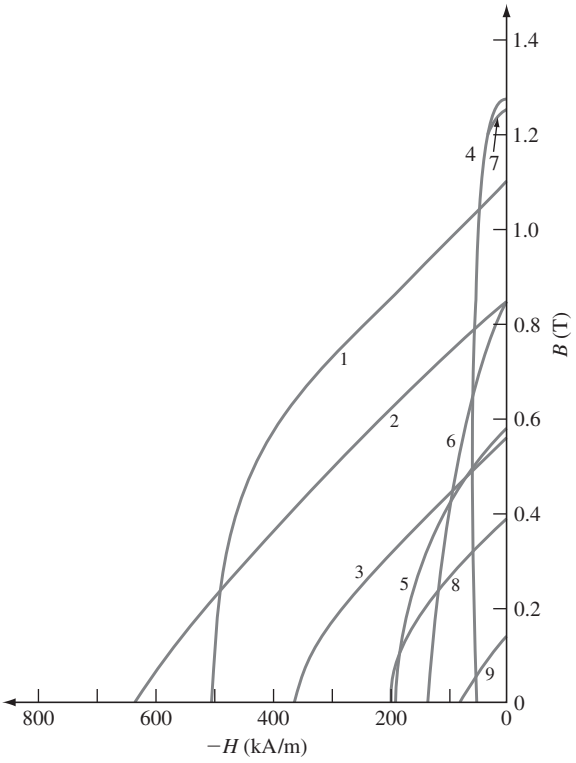


Figura 16.24
Curvas de desmagnetización de diversos materiales magnéticos duros. 1: $Sm(Co,Cu)_{7.4}$; 2: $SmCo_5$; 3: $SmCo_5$; ligado; 4: alnico 5; 5: Mn-Al-C; 6: alnico 8; 7: Cr-Co-Fe; 8: ferrita; y 9: ferrita ligada.
(Tomado de G. Y. Chin y J. H. Wernick, "Magnetic Materials, Bulk", vol. 14: "Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology", 3a. ed., Wiley, 1981, p. 673.)

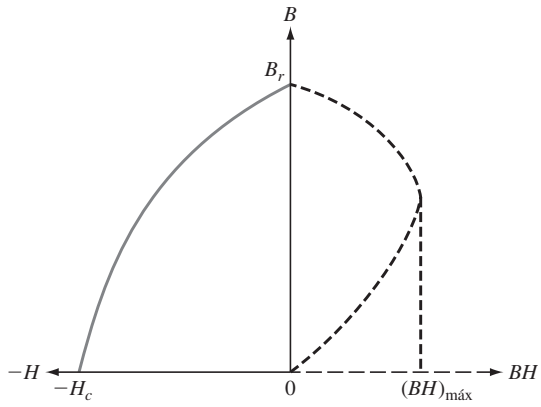


Figura 16.25
Con la línea punteada circular a la derecha del eje de *B* (inducción) se muestra un diagrama esquemático de la curva del producto de energía (*B* en función de *BH*) de un material magnético tal como una aleación de alnico. El producto de energía máximo se indica en la intersección de la línea punteada vertical y el eje *BH*.

nética de un material magnético duro se mide mediante su **producto de energía máxima $(BH)_{máx}$**, que es el valor máximo del producto de *B* (inducción magnética) y *H* (el campo de desmagnetización) determinado a partir de la curva de desmagnetización del material. En la figura 16.25 se muestra la curva de energía externa (*BH*) para un material magnético duro hipotético y su producto de energía máxima $(BH)_{máx}$. Básicamente, el producto de energía máxima de un material magnético duro es el área ocupada por el rectángulo más grande que puede inscribirse en el segundo cuadrante del ciclo de histéresis del material. Las unidades del SI para el producto de energía de *BH* son kJ/m^3; las unidades del sistema cgs son G · Oe. Las unidades del SI para el producto de energía $(BH)_{máx}$ de joules por metro cúbico, son unidades equivalentes al producto de las unidades de *B* en teslas y *H* en amperes por metro del modo siguiente:

$$\left[B\left(\cancel{T}\cdot\frac{\cancel{Wb}}{m^2}\cdot\frac{1}{\cancel{T}}\cdot\frac{\cancel{V\cdot s}}{\cancel{Wb}}\right)\right]\left[H\left(\frac{\cancel{A}}{m}\cdot\frac{J}{\cancel{V\cdot A\cdot s}}\right)\right]=BH\left(\frac{J}{m^3}\right)$$

PROBLEMA DE EJEMPLO 16.4

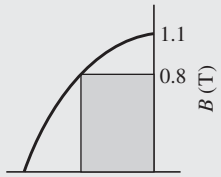
Calcule el producto de energía máxima $(BH)_{máx}$ para la aleación Sm $(Co, Cu)_{7.4}$ de la figura 16.24.

■ Solución

Se necesita determinar el área del rectángulo más grande que puede ubicarse dentro de la curva de desmagnetización del segundo cuadrante de la aleación que se muestra en la figura 16.24. Se enlistan cuatro áreas de ensayo:

$$\text{Ensayo 1} \sim (0.8\ \text{T} \times 250\ \text{kA/m}) = 200\ \text{kJ/m}^3 \qquad \text{(véase la figura EP16.4)}$$
$$\text{Ensayo 2} \sim (0.6\ \text{T} \times 380\ \text{kA/m}) = 228\ \text{kJ/m}^3$$
$$\text{Ensayo 3} \sim (0.55\ \text{T} \times 420\ \text{kA/m}) = 231\ \text{kJ/m}^3$$
$$\text{Ensayo 4} \sim (0.50\ \text{T} \times 440\ \text{kA/m}) = 220\ \text{kJ/m}^3$$

El valor más alto es de aproximadamente 231 kJ/m^3, el cual se compara con los 240 kJ/m^3 que se enlistan para la aleación de Sm (Cu, Co) en la tabla 16.5.



$$(BH)_{máx} \simeq (0.8\ \text{T} \times 250\ \text{kA/m}) = 200\ \text{kJ/m}^3$$

Figura EP16.4
Ensayo.

Tabla 16.5 Propiedades magnéticas seleccionadas de materiales magnéticos duros

Material y composición	Inducción remanente B_r (T)	Fuerza coercitiva H_c (kA/m)	Producto de energía máximo $(BH)_{máx}$ (kJ/m³)
Alnico 1, 12 Al, 21 Ni, 5 Co, 2 Cu, bal Fe	0.72	37	11.0
Alnico 5, 8 Al, 14 Ni, 25 Co, 3 Cu, bal Fe	1.28	51	44.0
Alnico 8, 7 Al, 15 Ni, 24 Co, 3 Cu, bal Fe	0.72	150	40.0
Tierra rara-Co, 35 Sm, 65 Co	0.90	675-1200	160
Tierra rara-Co, 25.5 Sm, 8 Cu, 15 Fe, 1.5 Zr, 50 Co	1.10	510-520	240
Fe-Cr-Co, 30 Cr, 10 Co, 1 Si, 59 Fe	1.17	46	34.0
$MO \cdot Fe_2O_3$ (M = Ba, Sr) (ferrita dura)	0.38	235-240	28.0

Fuente: G. Y. Chin y J. H. Wernick, "Magnetic Materiales, Bulk", vol. 14: *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 3a. ed., Wiley, 1981, p. 686.

16.9.2 Aleaciones de alnico

Propiedades y composiciones Las **aleaciones del alnico** (***al*uminio, *ní*quel, *co*balto**) son los materiales magnéticos duros comerciales más importantes que se utilizan en la actualidad. A éstos corresponde 35 por ciento del mercado de imanes duros en

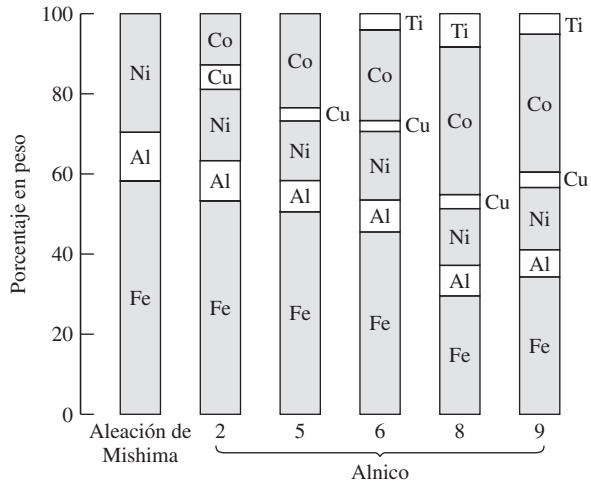


Figura 16.26
Composiciones químicas de las aleaciones de alnico. La aleación original fue descubierta por Mishima en Japón en 1931.
(Tomado de B. D. Cullity, "Introduction to Materials Magnetic", Addison-Wesley, 1972, p. 566.)

Estados Unidos. Estas aleaciones se caracterizan por un alto producto de energía [$(BH)_{máx}$ = 40 a 70 kA/m^3 (5 a 9 MG · Oe)], a alta inducción remanente [B_r = 0.7 a 1.35 T (7 a 13.5 kG)], y una coercitividad moderada [H_c = 40 a 160 kA/m (500 a 2010 Oe)]. En la tabla 16.5 se enlistan algunas propiedades magnéticas de varias aleaciones magnéticas de alnico y de otras permanentes.

La familia de aleaciones de alnico se basa en hierro con adiciones de Al, Ni y Co más 3 por ciento de Cu, aproximadamente. Se agrega un pequeño porcentaje de Ti a las aleaciones de alta coercitividad, alnicos 6 a 9. En la figura 16.26 se muestran gráficas de barra de las composiciones de algunas aleaciones de alnico. Los alnicos de 1 a 4 son isotrópicos, en tanto que los de 5 a 9 son anisotrópicos debido a que se tratan térmicamente en un campo magnético mientras se forman los precipitados. Las aleaciones de alnico son frágiles y por ello se producen mediante fundición o procesos metalúrgicos de polvos. Los polvos de alnico se usan principalmente para producir grandes cantidades de pequeños artículos con formas complejas.

Estructura Por arriba de su temperatura de tratamiento térmico de solubilidad de casi 1 250°C, las aleaciones de alnico tienen una fase con estructura cristalina BCC. Durante el enfriamiento hasta cerca de 750 a 850°C, estas aleaciones se descomponen en otras dos fases BCC, α y α'. La fase de la matriz α es rica en Ni y Al y débilmente magnética. El precipitado α' es rico en Fe y Co y por ello tiene una magnetización superior que la fase α rica en Ni-Al. La fase α' tiende a una forma de barra, alineada en las direcciones $\langle 100 \rangle$, y de casi 10 nm de diámetro y aproximadamente 100 nm de largo.

Si el tratamiento térmico a 800°C se lleva a cabo en un campo magnético, el precipitado α' forma finas partículas elongadas en la dirección del campo magnético (figura 16.27) en una matriz de la fase α (**recocido magnético**). La alta coercitividad de los alnicos se atribuye a la dificultad de rotar partículas de un dominio de la fase α' con base en la anisotropía de la forma. Cuanto mayor es el cociente del aspecto (lon-

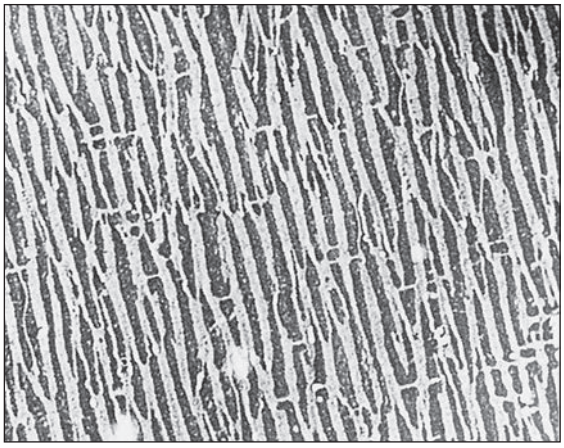


Figura 16.27
Micrografía de electrones de réplica que muestra la estructura de la aleación de alnico 8 (Al-Ni-Co-Fe-Ti) después de un tratamiento térmico a 800°C durante 9 minutos en un campo magnético aplicado. La fase α (rica en Ni-Al) es clara y la fase α' (rica en Fe-Co), oscura. La fase α', altamente ferromagnética, se elonga en la dirección del campo aplicado y crea anisotropía de la fuerza coercitiva.
(Cortesía de K. J. deVos, 1966.)

gitud/ancho) de las barras y cuanto más lisa es su superficie, tanto mayor resulta la coercitividad de la aleación. De este modo, la formación del precipitado en un campo magnético hace que primero sea más largo y más delgado y que por ello se incremente la coercitividad del material magnético del alnico. Se cree que la adición de titanio a alguno de los alnicos de más alta resistencia incrementa sus coercitividades al aumentar el cociente de aspecto de las barras α'.

16.9.3 Aleaciones de tierras raras

Los imanes de **aleación de tierras raras** se producen a gran escala en Estados Unidos y tienen resistencias magnéticas superiores a las de cualquier material magnético comercial. Presentan productos de energía máxima $(BH)_{máx}$ hasta de 240 kJ/m^3 (30 MG · Oe) y coercitividades hasta de 3 200 kA/m (40 kOe). El origen del magnetismo en los elementos de transición de tierras raras se debe casi por completo a sus electrones 4*f* no apareados, en la misma forma que el magnetismo en el Fe, Co y Ni se debe a sus electrones 3*d* no apareados. Hay dos grupos principales de materiales magnéticos comerciales de tierras raras: uno basado en $SmCo_5$ de una fase y el otro en aleaciones endurecidas por precipitación de la composición aproximada $Sm(Co,Cu)_{7.5}$.

Los imanes de una sola fase de $SmCo_5$ son el tipo que más se utiliza. El mecanismo de coercitividad en estos materiales se basa en la nucleación y/o fijación de las paredes del dominio en superficies y fronteras de grano. Estos materiales se fabrican por medio de técnicas de metalurgia de polvos utilizando partículas finas (1 a 10 μm). Durante el prensado las partículas se alinean en un campo magnético. Las partículas prensadas después se sinterizan de manera cuidadosa para evitar el crecimiento de partícula. Las intensidades magnéticas de estos materiales son altas, con valores de $(BH)_{máx}$ en el intervalo de 130 a 160 kJ/m^3 (16 a 20 MG · Oe).

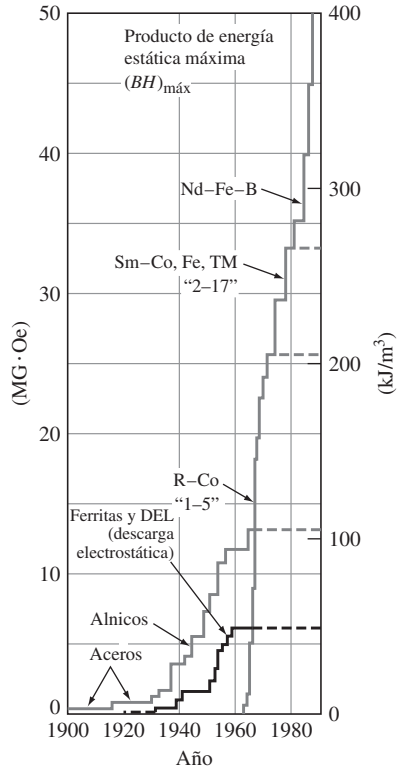


Figura 16.28
Avance en la calidad de imanes permanentes en el siglo xx, según se mide mediante el producto de energía máximo $(BH)_{máx}$.
(Tomado de K. J. Strnat, Soft and Hard Magnetic Materials with Applications, ASM Inter., 1986, p. 64.)

En la aleación $Sm(Co,Cu)_{7.5}$ endurecida por precipitación, parte del Co se sustituye por Cu en $SmCo_5$, de manera que un precipitado fino (alrededor de 10 nm) se produce a una baja temperatura de envejecimiento (400 a 500°C). El precipitado que se forma es coherente con la estructura del $SmCo_5$. El mecanismo de coherencia aquí se basa principalmente en la fijación homogénea de paredes del dominio en las partículas precipitadas. Estos materiales también se forman comercialmente por medio de procesos de metalurgia de polvos utilizando el alineamiento magnético de las partículas. La adición de pequeñas cantidades de hierro y circonio promueve el desarrollo de coercitividades superiores. Valores comunes para una aleación comercial de $Sm(Co_{0.68}Cu_{0.10}Fe_{0.21}Zr_{0.01})_{7.4}$ son $(BH)_{máx} = 240$ kJ/m^3 (30 MG · Oe) y $B_r = 1.1$ T (11 000 G). En las figuras 16.24 y 16.28 se muestra el mejoramiento sobresaliente en las resistencias magnéticas alcanzado con aleaciones magnéticas de tierras raras.

Los imanes de Sm-Co se usan en dispositivos médicos tales como diminutos motores en bombas y válvulas implantables y como apoyo en el movimiento de los párpados. Los imanes de tierras raras también se utilizan en relojes de pulsera electrónicos y en tubos de ondas viajeras. Los motores y generadores de corriente directa y síncronos se producen utilizando imanes de tierras raras, lo que resulta en una reducción de tamaño.

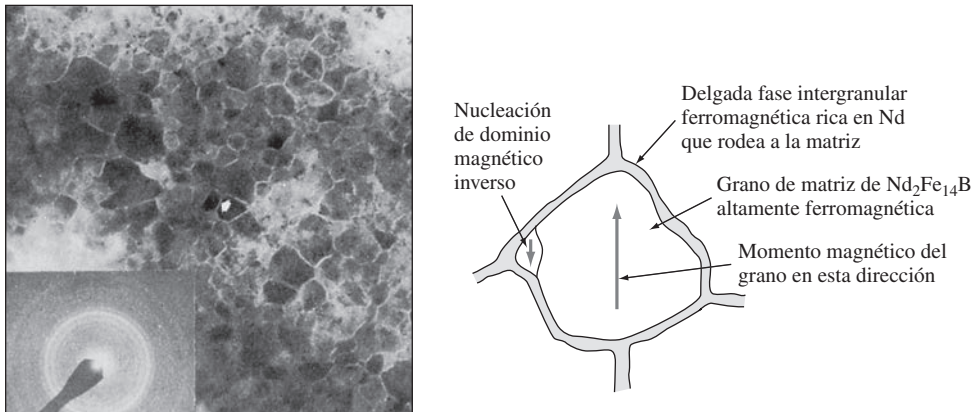


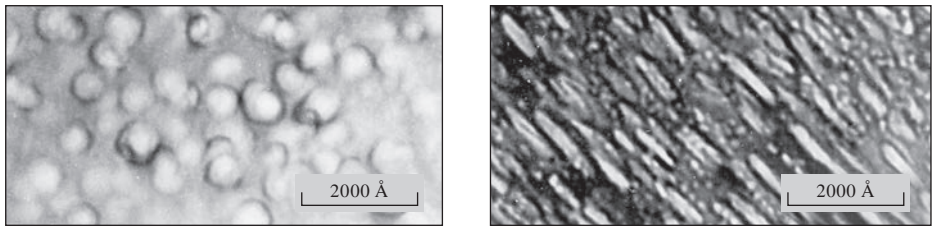
Figura 16.29
a) Micrografía de transmisión de electrones de campo brillante de una tira de Nd-Fe-B templada de manera óptima y que muestra granos orientados al azar, rodeados por una delgada fase intergranular que se marca con una flecha.
(Tomado de J. J. Croat y J. F. Herbst, MRS Bull., junio de 1988, p. 37.)
b) Grano individual de $Nd_2Fe_{14}B$ que muestra la nucleación del dominio magnético inverso.

16.9.4 Aleaciones magnéticas de niodimio-hierro-boro

Los materiales magnéticos duros de Nd-Fe-B con productos $(BH)_{máx}$ tan altos como 300 kJ/m^3(45 MG · Oe) se descubrieron alrededor de 1984, y en la actualidad estos materiales se producen tanto mediante procesos de metalurgia de polvos como de tiras fundidas y centrifugadas de solidificación rápida. En la figura 16.29*a* se muestra la microestructura de una tira rápidamente solidificada de tipo $Nd_2Fe_{14}B$. En esta estructura los granos de matrices de $Nd_2Fe_{14}B$ altamente ferromagnética se rodean con una fase intergranular delgada ferromagnética rica en Nd. La alta coercitividad y el producto de energía $(BH)_{máx}$ asociado de este material surgen de la dificultad de nuclear dominios magnéticos inversos que suelen nuclearse en los límites de grano de la matriz (figura 16.29*b*). Las fuerzas de las fases ricas en Nd no ferromagnéticas intergranulares, obligan a que los granos de la matriz de $Nd_2Fe_{14}B$ formen núcleos con sus dominios inversos para revertir la magnetización del material. Este proceso hace máximos H_c y $(BH)_{máx}$ para el agregado total del material. Las aplicaciones de los imanes permanentes de Nd-Fe-B incluyen todos los tipos de motores eléctricos, y en especial aquellos similares a los motores de arranque automotrices donde son convenientes la reducción en el peso y la compactación.

16.9.5 Aleaciones magnéticas de hierro-cromo-cobalto

Una familia de **aleaciones de hierro-cromo-cobalto** se formuló en 1971; estas aleaciones son análogas a las de alnico en estructura metalúrgica y propiedades magnéticas permanentes, aunque las primeras se forman en frío a temperatura ambiente. Una composición común de una aleación de este tipo es 61% Fe–28% Cr–11% Co. Las propiedades magnéticas características de las aleaciones de Fe-Cr-Co son $B_r = 1.0$ a



a) *b*)

Figura 16.30
Micrografías electrónicas de transmisión de una aleación de Co con 34% de Fe y 12% de Cr, que muestran *a*) precipitados esféricos producidos después de la deformación y *b*) partículas elongadas y alineadas después de la deformación y el alineamiento por medio de un tratamiento térmico final.
[Tomado de S. Jin et al., J. Appl. Phys., **53:***4300 (1982).]*

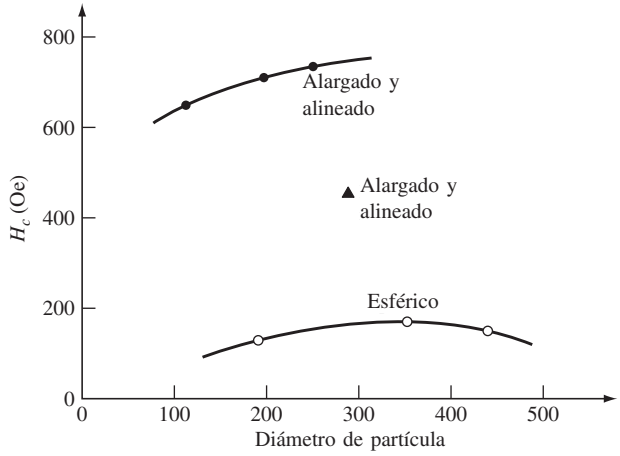
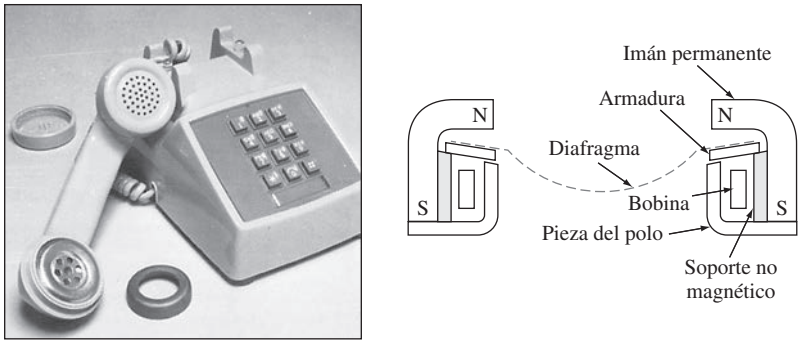


Figura 16.31
Coercitividad en función del diámetro de partícula para partículas de forma diferente en una aleación de Co con 34% de Fe y 12% de Cr. Adviértase el gran aumento en la coercitividad al cambiar de una forma esférica a una alargada.
[Tomado de S. Jin et al., J. Appl. Phys., **53:***4300 (1982).]*

1.3 T (10 a 13 kG), H_c = 150 a 600 A/cm (190 a 753 Oe) y $(BH)_{máx}$ = 10 a 45 kJ/m^3 (1.3 a 1.5 MG · Oe). En la tabla 16.5 se enlistan algunas propiedades comunes de una aleación magnética de Fe-Cr-Co.

Las aleaciones de Fe-Cr-Co tienen una estructura BCC a elevadas temperaturas por encima de aproximadamente 1 200°C. Luego de un enfriamiento lento (más o menos 15°C/h) desde arriba de 650°C, los precipitados de una fase α_2 rica en Cr (figura 16.30*a*) con partículas alrededor de (300 Å) forman una matriz de una fase α_1 rica en Fe. El mecanismo de coercitividad en las aleaciones de Fe-Cr-Co es la fijación de las paredes de dominios mediante las partículas de precipitados, ya que los dominios magnéticos se extienden a través de ambas fases. La forma de la partícula (figura 16.30*b*) es importante pues la elongación de las partículas mediante deformación antes del tratamiento de envejecimiento final aumenta de manera considerable la coercitividad de estas aleaciones, como se indica con claridad en la figura 16.31.



a) *b*)

Figura 16.32
Empleo de la aleación de Fe-Cr-Co dúctil permanente en un receptor telefónico. *a*) Receptor desarmado; se muestra el anillo del imán permanente y *b*) vista de la sección transversal del receptor telefónico de tipo U y posición del imán permanente.
[Tomado de S. Jin et al., IEEE trans. Magn., **17:***2935 (1981).]*

Las aleaciones de Fe-Cr-Co son especialmente importantes en aplicaciones de ingeniería donde su ductilidad en frío permite la formación a temperatura ambiente y alta velocidad. El imán permanente de muchos receptores telefónicos modernos es un ejemplo de esta aleación magnética permanente conformada en frío (figura 16.32).

16.10 FERRITAS

Las ferritas son materiales cerámicos magnéticos formados al mezclar óxido de hierro (Fe_2O_3) con otros óxidos y carbonatos en la forma pulverizada. Los polvos se prensan después en conjunto y se sinterizan en alta temperatura. En ocasiones es necesario el maquinado para producir la forma final que se desea de la pieza (figura 16.33). Las magnetizaciones que se producen en las ferritas son suficientemente altas para ser de valor comercial, aunque sus saturaciones magnéticas no son tan grandes como las de los materiales ferromagnéticos. Las ferritas tienen estructuras de dominio y ciclos de histéresis similares a las de los materiales ferromagnéticos. Como en el caso de estos últimos, hay *ferritas blandas* y *duras.*

16.10.1 Ferritas magnéticamente blandas

Los materiales de **ferrita blanda** exhiben comportamiento ferrimagnético. En las ferritas blandas hay un momento magnético neto debido a dos conjuntos de momentos de espín electrónicos internos no apareados en direcciones opuestas que no se cancelan entre sí (figura 16.8*c*).

Composición y estructura de ferritas blandas cúbicas La mayoría de las ferritas blandas cúbicas tienen la composición $MO \cdot Fe_2O_3$, donde M es un ion metálico divalente como Fe^{2+}, Mn^{2+}, Ni^{2+}, o Zn^{2+}. La estructura de las ferritas blandas se basa en la estructura de espinela inversa, que es una modificación de la estructura de la espi-

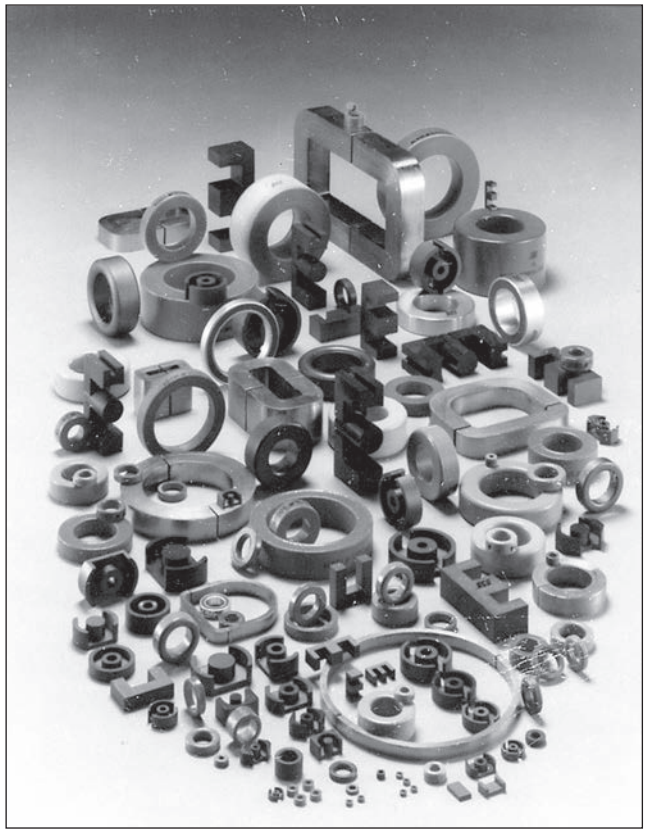


Figura 16.33
Diversas piezas de ferrita blanda que se usan en muchas aplicaciones eléctricas y electrónicas.
(Cortesía de Magnetics, a división of Spang & Company.)

nela mineral ($MgO \cdot Al_2O_3$). Las estructuras tanto de espinela como de espinela inversa tienen celdas unitarias cúbicas conformadas por ocho subceldas, como se muestra en la figura 16.34*a*. Cada una de las subceldas consta de una molécula de $MO \cdot Fe_2O_3$. Puesto que cada subunidad contiene una molécula de $MO \cdot Fe_2O_3$ y puesto que hay siete iones en esta molécula, cada celda unitaria contiene un total de 7 iones $\times$ 8 subceldas $=$ 56 iones por celda unitaria. Cada celda de subunidad tiene una estructura de cristal FCC conformada por cuatro iones de la molécula $MO \cdot Fe_2O_3$ (figura 16.34*b*). Los iones metálicos son mucho más pequeños (M^{2+} y Fe^{3+}), los cuales tiene radios iónicos de casi 0.07 a 0.08 nm, ocupan espacios intersticiales entre los iones de oxígeno más grandes (radio iónico $\approx$ 0.14).

Como se discutió antes, en una celda unitaria FCC hay el equivalente de cuatro sitios intersticiales octaédricos y ocho tetraédricos. En la estructura de espinela normal sólo la mitad de los sitios octaédricos están ocupados, y por ello únicamente $\frac{1}{2}$ 8 subceldas $\times$ 4 sitios/subceldas $=$ *se ocupan 16 sitios octaédricos* (tabla 16.6). En la estructura de espinela normal hay 8 $\times$ 8 (sitios tetraédricos por subcelda) $=$ 64 si-

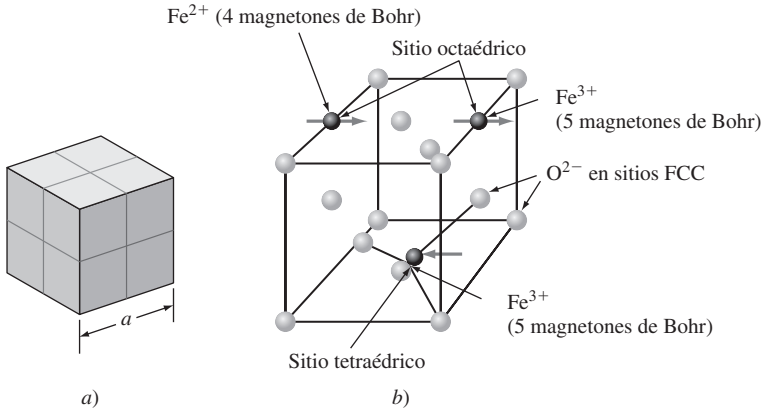


Figura 16.34
a) Celda unitaria de ferrita blanda del tipo $MO \cdot Fe_2O_3$. La celda unitaria está compuesta por ocho subceldas. *b*) La subcelda para la ferrita de $FeO \cdot Fe_2O_3$. Los momentos magnéticos de los iones en los sitios octaédricos se alinean en una dirección mediante el campo magnético aplicado, y aquellos en los sitios tetraédricos lo hacen en la dirección opuesta. En consecuencia, hay un momento magnético neto de la subcelda y, por tanto, del material.

Tabla 16.6 Arreglos de iones metálicos en una celda unitaria de una ferrita de espinela de composición $MO \cdot Fe_2O_3$

Tipo de sitio intersticial	Números disponibles	Números ocupados	Espinela normal	Espinela inversa
Tetraédrico	64	8	8 M^{2+}	8 Fe^{3+}
Octahédrico	32	16	16 Fe^{3+}	8 Fe^{3+}, 8 M^{2+}

tios/celda unitaria. Sin embargo, en la estructura de espinela normal sólo un octavo de los 64 sitios está ocupado, por lo que únicamente *se ocupan ocho de los sitios tetraédricos* (tabla 16.6).

En la celda unitaria de **estructura de espinela normal** hay ocho moléculas de $MO \cdot Fe_2O_3$. En esta estructura los iones 8 M^{2+} ocupan 8 sitios tetraédricos y los iones 16 Fe^{3+} ocupan 16 sitios octaédricos. Sin embargo, en la **estructura de espinela inversa** hay un arreglo diferente de los iones. Los iones 8 M^{2+} ocupan 8 sitios octaédricos, y los iones 16 Fe^{3+} se dividen de manera que 8 ocupan sitios octaédricos y 9 sitios tetraédricos (tabla 16.6).

Momentos magnéticos netos en ferritas de espinela inversa Para determinar el momento magnético neto de cada una de las moléculas de ferrita de $MO \cdot Fe_2O_3$, es necesario conocer la configuración electrónica interior 3*d* de los iones de ferrita. La figura 16.35 proporciona esta información. Cuando se ioniza el átomo de Fe para formar el ion Fe^{2+}, hay *cuatro* electrones 3*d* no apareados que quedan después de la pér-

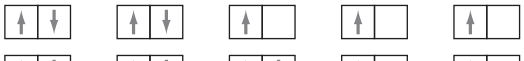
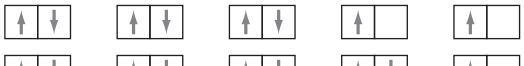
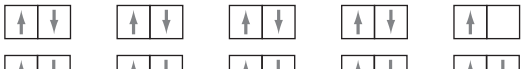
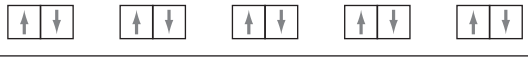
Ion	Número de electrones	Configuración electrónica de los orbitales 3*d*	Momento magnético iónico (magnetones de Bohr)
Fe^{3+}	23		5
Mn^{2+}	23		5
Fe^{2+}	24		4
Co^{2+}	25		3
Ni^{2+}	26		2
Cu^{2+}	27		1
Zn^{2+}	28		0

Figura 16.35
Configuraciones electrónicas y momentos magnéticos iónicos de algunos elementos de transición 3*d*.

Tabla 16.7 Arreglos de iones y momentos magnéticos netos por molécula, en ferritas de espinela normal e inversa

Ferrita	Estructura	Sitios tetraédricos ocupados	Sitios octaédricos ocupados		Momento magnético neto (μ_s/molécula)
$FeO \cdot Fe_2O_3$	Espinela inversa	Fe^{3+} 5 ←	Fe^{2+} 4 →	Fe^{3+} 5 →	4
$ZnO \cdot Fe_2O_3$	Espinela normal	Zn^{2+} 0	Fe^{3+} 5 ←	Fe^{3+} 5 →	0

dida de dos electrones 4*s*. Cuando el átomo de Fe se ioniza para formar el ion Fe^{3+}, hay *cinco* electrones no apareados que quedan después de la pérdida de dos electrones 4*s* y uno 3*d*.

Puesto que cada electrón 3*d* no apareado tiene un momento magnético de un magnetón de Bohr, el ion Fe^{2+} tiene un momento de cuatro magnetones de Bohr y el ion Fe^{3+}, de cinco magnetones de Bohr. En un campo magnético aplicado, los momentos magnéticos de los iones octaédricos y tetraédricos se oponen entre sí (figura 16.34*b*). De este modo, en el caso de la ferrita $FeO \cdot Fe_2O_3$, los momentos magnéticos de los ocho iones Fe^{3+} en sitios octaédricos cancelarán los momentos magnéticos de los ocho iones Fe^{3+} en los sitios tetraédricos. Así, el momento magnético resultante de esta ferrita se deberá a los ocho iones Fe^{2+} en los ocho sitios octaédricos, cada uno de los cuales tiene momentos de cuatro magnetones de Bohr (tabla 16.7). Un valor teórico para la saturación magnética de la ferrita de $FeO \cdot Fe_2O_3$ se calcula en el problema de ejemplo 16.5 con base en la intensidad del magnetón de Bohr de los iones de Fe^{2+}.

Las ferritas de hierro, cobalto y níquel tienen la estructura de espinela inversa, y todas son ferrimagnéticas debido a un momento magnético neto de sus estructuras ió-

PROBLEMA DE EJEMPLO 16.5

Calcule la magnetización por saturación teórica M en amperes por metro y la inducción por saturación B_s en teslas para $FeO \cdot Fe_2O_3$. Ignore el término $\mu_0 H$ para el cálculo de B_s. La constante de retícula de la celda unitaria de $FeO \cdot Fe_2O_3$ es 0.839 nm.

■ Solución

El momento magnético para una molécula de $FeO \cdot Fe_2O_3$ se debe por completo a los cuatro magnetones de Bohr del ion Fe^{2+} puesto que los electrones no apareados de los iones Fe^{3+} se cancelan entre sí. Debido a que hay ocho moléculas de $FeO \cdot Fe_2O_3$ en la celda unitaria, el momento magnético total por celda unitaria es

$$\begin{pmatrix}\text{4 magnetones de Bohr/subcelda})(\text{8 subceldas/celda unitaria}) = \text{32 magnetones}\\ \text{de Bohr/celda unitaria}\end{pmatrix}$$

Por tanto,

$$M = \left[\frac{\text{32 magnetones de Bohr/celda unitaria}}{(8.39 \times 10^{-10}\ \text{m})^3/\text{celda unitaria}}\right]\left(\frac{9.27 \times 10^{-24}\ \text{A} \cdot \text{m}^2}{\text{magnetón de Bohr}}\right)$$
$$= 5.0 \times 10^5\ \text{A/m} \blacktriangleleft$$

B_s en la saturación, suponiendo que todos los momentos magnéticos están alineados e ignorando el término H, está dado por la ecuación $B_s \approx \mu_0 M$. En consecuencia,

$$B_s \approx \mu_0 M \approx \left(\frac{4\pi \times 10^{-7}\ \text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}\right)\left(\frac{5.0 \times 10^5\ \text{A}}{\text{m}}\right)$$
$$= 0.63\ \text{T} \blacktriangleleft$$

nicas. Las ferritas blandas industriales suelen consistir en una mezcla de ferritas puesto que es posible obtener mayores magnetizaciones por saturación a partir de dichas mezclas. Las dos ferritas industriales más comunes son la ferrita de níquel-zinc ($Ni_{1-x}Zn_xFe_{2-y}O_4$) y la ferrita de manganeso zinc ($Mn_{1-x}Zn_xFe_{2+y}O_4$).

Propiedades y aplicaciones de ferritas blandas

Pérdidas por corrientes parásitas en materiales magnéticos Las ferritas blandas son materiales magnéticos importantes porque, además de tener propiedades magnéticas útiles, son aislantes y tienen altas resistividades eléctricas. Una alta resistividad eléctrica es importante en aplicaciones magnéticas que requieren altas frecuencias, ya que si el material magnético es conductor, las pérdidas de energía por corrientes parásitas serían más grandes a frecuencias altas. Las corrientes parásitas resultan de gradientes de voltaje inducidos y, por ello, cuanto más alta sea la frecuencia, tanto mayor será el aumento en las corrientes parásitas. Puesto que las ferritas blandas son aisladores, pueden utilizarse en aplicaciones magnéticas como los núcleos de transformador que operan a altas frecuencias.

Aplicaciones de ferritas blandas Algunos de los usos más importantes de las ferritas blandas corresponden a aplicaciones de señales débiles, núcleos de memoria, audiovisuales y cabezas de grabación. En niveles de señales bajas, se usan algunos núcleos de ferrita para transformadores y para inductores de baja energía. Un uso de gran tonelaje de ferritas blandas corresponde a núcleos de horquilla de desviación de yugo, transformadores de punto de retorno y bobinas de convergencia para receptores de televisión.

Las ferritas de espinela de Mn-Zn y Ni-Zn se utilizan en cabezas de grabación magnéticas para diversos tipos de cintas magnéticas. Las cabezas de grabación se construyen a partir de ferrita de Ni-Zn policristalina, ya que las frecuencias de operación que se necesitan (100 kHz a 2.5 GHz) son demasiado elevadas para cabezas de aleación metálica debido a las altas pérdidas por corrientes parásitas.

Las memorias de núcleo magnético basadas en la lógica binaria de 0 y 1 se utilizan en algunos tipos de computadoras. El núcleo magnético es útil donde la pérdida de energía eléctrica no produce pérdida de información. Puesto que las memorias de núcleo magnético no tienen partes móviles, se usan cuando se necesita una alta resistencia al choque eléctrico, como en algunos usos militares.

16.10.2 Ferritas magnéticamente duras

Un grupo de **ferritas duras** que se usan para imanes permanentes tienen la fórmula general $MO \cdot 6Fe_2O_3$ y tienen una estructura cristalina hexagonal. La ferrita más importante de este grupo es la de *bario* ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$), la cual fue representada en Holanda por la compañía Philips en 1952 con el nombre comercial Ferroxdure. En los últimos años las ferritas de bario se han sustituido hasta cierto grado por las de estroncio, que tienen una fórmula general ($SrO \cdot 6Fe_2O_3$) y que tienen propiedades magnéticas superiores comparadas con las de ferritas de bario. Estas ferritas se producen casi mediante el mismo método que se utiliza para las ferritas blandas, con la mayor parte prensada en húmedo en un campo magnético para alinear los ejes de magnetización fácil de las partículas con el campo aplicado.

Las ferritas hexagonales son económicas, de baja densidad y tienen una alta fuerza coercitiva, como se ilustra en la figura 16.24. Las elevadas intensidades magnéticas de estos materiales se deben principalmente a su alta anisotropía magnetocristalina. Se piensa que la magnetización de estos materiales ocurre mediante la nucleación y movimiento de las paredes del dominio debido a que su tamaño de grano es demasiado grande para un comportamiento de un solo dominio. Sus productos de energía $(BH)_{máx}$ varían de 14 a 28 kJ/m^3.

Estos imanes permanentes cerámicos de ferritas duras tienen un uso muy amplio en generadores, relevadores y motores. Las aplicaciones electrónicas incluyen imanes para altavoces, timbres telefónicos y receptores. También se emplean en dispositivos de retención para cierres de puerta, sellos y cerrojos y se emplean en muchos diseños de juguetes.

16.11 RESUMEN

Los materiales magnéticos son materiales industriales importantes utilizados en muchos diseños de ingeniería. La mayor parte de los materiales magnéticos industriales son *ferro* o *ferrimagnéticos* y presentan una gran magnetización. Los materiales ferromagnéticos más importantes se basan en aleaciones de Fe, Co y Ni. En tiempos recientes se han fabricado algunas aleaciones ferromagnéticas con algunos elementos de tierras raras como el Sm. En materiales ferromagnéticos como el Fe, existen regiones llamadas *dominios magnéticos* en las que los momentos dipolares magnéticos atómicos se alinean paralelos entre sí. La estructura de dominios magnéticos en un material ferromagnético se determina por medio de las siguientes energías que se minimizan: energías de intercambio, magnetoestática, magnetocristalina de anisotropía, de pared del dominio y magnetoestrictiva. Cuando los dominios ferromagnéticos en una muestra se encuentran en orientaciones aleatorias, la muestra está en

un estado desmagnetizado. Cuando se aplica un campo magnético a una muestra de material ferromagnético, se alinean los dominios en la muestra; el material se magnetiza y permanece así hasta cierto grado cuando se suprime el campo. El comportamiento de magnetización de un material ferromagnético se registra mediante una gráfica de inducción magnética en función del campo aplicado que recibe el nombre de ciclo *de histéresis*. Cuando un material ferromagnético desmagnetizado se magnetiza mediante un campo aplicado H, su inducción magnética B alcanza a la larga un nivel de saturación llamado *inducción de saturación* B_s. Cuando se suprime el campo aplicado, la inducción magnética disminuye hasta un valor que se denomina *inducción remanente* B_r. El campo desmagnetizante que se requiere para reducir la inducción magnética de una muestra ferromagnética magnetizada hasta cero recibe el nombre de la *fuerza coercitiva* H_c.

Un *material magnético blando* es aquel que se magnetiza y desmagnetiza con facilidad. Son importantes propiedades magnéticas de un material magnético blando una alta permeabilidad, alta inducción por saturación y baja fuerza coercitiva. Cuando un material ferromagnético blando se magnetiza y desmagnetiza repetidamente, se presentan pérdidas de energía por *histéresis* y por *corrientes parásitas*. Los ejemplos de los materiales ferromagnéticos blandos incluyen aleaciones de Fe con 3 a 4% de Si que se utilizan en motores, transformadores y generadores eléctricos, así como aleaciones de Ni con 20 a 50% de Fe que se emplean sobre todo en equipo de comunicaciones de alta sensibilidad.

Un *material magnético duro* es aquel que es difícil de magnetizar y que permanece magnetizado en un alto grado después de que se suprime el campo magnetizante. Propiedades importantes de un material magnético duro son alta fuerza coercitiva y alta inducción por saturación. La potencia de un material magnético duro se mide mediante su producto de energía máxima, que es el valor máximo del producto de B y H en el cuadrante desmagnetizante de su ciclo de histéresis B-H. Ejemplos de materiales magnéticos duros son los alnicos, los cuales se utilizan como imanes permanentes en muchas aplicaciones eléctricas, y algunas aleaciones de tierras raras que se basan en composiciones de $SmCo_5$ y $Sm(Co, Cu)_{7.5}$. Las aleaciones de tierras raras se usan en pequeños motores y en otras aplicaciones que requieren un material magnético de producto de energía extremadamente alto.

Las *ferritas*, que son compuestos cerámicos, constituyen otro tipo de materiales magnéticos importantes desde la perspectiva industrial. Estos materiales son ferrimagnéticos debido a un momento magnético neto producido por su estructura iónica. La mayoría de las ferritas magnéticamente blandas tienen la composición básica $MO \cdot Fe_2O_3$, donde M es un ion divalente como Fe^{2+}, Mn^{2+} y Ni^{2+}. Estos materiales tienen la *estructura de espinela inversa* y se emplean en aplicaciones de señales débiles, núcleos de memoria, audiovisuales y cabezas de grabación, entre otras. Puesto que estos materiales son aislantes, es posible utilizarlos en aplicaciones de alta frecuencia donde las corrientes parásitas son un problema con los campos alternos. Las ferritas magnéticamente duras con la fórmula general $MO \cdot 6Fe_2O_3$, donde M suele ser un ion de Ba o Sr, se usan en aplicaciones que requieren materiales magnéticos permanentes de bajo costo y baja densidad. Estos materiales se emplean en altavoces, timbres telefónicos y receptores, y en dispositivos de retención para puertas, sellos y cerrojos.

16.12 DEFINICIONES

Sección 16.2

Material ferromagnético: aquel que es capaz de magnetizarse de manera considerable. El hierro, el cobalto y el níquel elementales son materiales ferromagnéticos.

Campo magnético *H*: el campo magnético producido por un campo magnético aplicado externo o el campo magnético producido por una corriente que pasa a través de un alambre conductor o bobina de alambre (solenoide).

Magnetización *M*: medida del aumento en el flujo magnético debido a la inserción de un material dado en un campo magnético de intensidad *H*. En unidades del SI la magnetización es igual a la permeabilidad del vacío (μ_0) multiplicada por la magnetización, o $\mu_0 M$. ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-4}$ T · m/A.)

Inducción magnética *B*: la suma del campo aplicado *H* y la magnetización *M* debida a la inserción de un material dado en el campo aplicado. En unidades del SI, $B = \mu_0(H + M)$.

Permeabilidad magnética μ: el cociente entre la inducción magnética *B* y el campo magnético aplicado *H* en un material; $\mu = B/H$.

Permeabilidad relativa μ_r: el cociente entre la permeabilidad de un material y la permeabilidad del vacío; $\mu_r = \mu/\mu_0$.

Susceptibilidad magnética χ_m: el cociente entre *M* (magnetización) y *H* (campo magnético aplicado); $\chi_m = M/H$.

Sección 16.3

Diamagnetismo: la reacción débil, negativa y repulsiva de un material a un campo magnético aplicado; un material diamagnético tiene una pequeña susceptibilidad magnética negativa.

Paramagnetismo: reacción débil, positiva, atractiva de un material a un campo magnético aplicado; un material paramagnético tiene una pequeña susceptibilidad magnética positiva.

Ferromagnetismo: la creación de una magnetización muy grande en un material cuando se somete a un campo magnético aplicado. Después de que se suprime el campo aplicado, el material ferromagnético retiene mucho de la magnetización.

Magnetón de Bohr: el momento magnético producido en un material ferro o ferrimagnético por un electrón no apareado sin interacción con cualesquiera otros; el magnetón de Bohr es una unidad fundamental. 1 magnetón de Bohr = 9.27×10^{-24} A · m^2.

Antiferromagnetismo: un tipo de magnetismo en el que los dipolos magnéticos de átomos se alinean en direcciones opuestas por medio de un campo magnético aplicado de manera que no hay magnetización neta.

Ferrimagnetismo: un tipo de magnetismo en el cual los momentos de dipolo magnético de diferentes iones de un sólido ligado iónicamente se alinean por medio de un campo magnético en forma antiparalela de manera que hay un momento magnético neto.

Sección 16.4

Temperatura de Curie: la temperatura en la cual un material ferromagnético cuando se calienta completamente pierde su ferromagnetismo y se vuelve paramagnético.

Sección 16.5

Dominio magnético: región en un material ferro o ferrimagnético en la cual se alinean todos los momentos de dipolo magnéticos.

Sección 16.6

Energía de intercambio: la energía asociada con el acoplamiento de dipolos magnéticos individuales en un solo dominio magnético. La energía de intercambio puede ser positiva o negativa.

Energía magnetoestática: la energía potencial magnética debida al campo magnético externo que rodea a una muestra de un material ferromagnético.

Energía de anisotropía magnetocristalina: la energía que se requiere durante la magnetización de un material ferromagnético para rotar los dominios magnéticos debido a la anisotropía cristalina. Por ejemplo, la diferencia en energía de magnetización entre la dirección de magnetización [111] difícil y la dirección [100] fácil en Fe es de aproximadamente 1.4×10^4 J/m^3.

Energía de la pared de dominio: la energía potencial asociada con el desorden de los momentos de dipolo en el volumen de la pared entre dominios magnéticos.

Magnetoestricción: el cambio en la longitud de un material ferromagnético en la dirección de magnetización debido a un campo magnético aplicado.

Energía magnetoestrictiva: la energía debida al esfuerzo mecánico causado por la magnetoestricción en un material ferromagnético.

Sección 16.7

Ciclo de histéresis: la gráfica de B en función de H o de M en función de H trazada mediante la magnetización y desmagnetización de un material ferro o ferrimagnético.

Inducción por saturación B_s: el valor máximo de la inducción B_s o magnetización M_s para un material ferromagnético.

Inducción remanente B_r: el valor de B o M en un material ferromagnético después de que H se reduce a cero.

Fuerza coerciva H_c: el campo magnético aplicado que se requiere para disminuir hasta cero la inducción magnética de un material magnetizado ferro o ferrimagnético.

Sección 16.8

Material magnético blando: un material magnético con una alta permeabilidad y baja fuerza coercitiva.

Pérdida de energía por histéresis: el trabajo o energía perdida al seguir un ciclo de histéresis *B-H*. La mayor parte de la energía perdida se gasta en mover las fronteras del dominio durante la magnetización.

Pérdidas de energía por corrientes parásitas: las pérdidas de energía en materiales magnéticos mientras se utilizan campos alternos; las pérdidas se deben a corrientes inducidas en el material.

Aleaciones de hierro-silicio: aleaciones de Fe con 3 a 4% de Si que son materiales magnéticos blandos con altas inducciones por saturación. Estas aleaciones se usan en motores, transformadores y generadores eléctricos de baja frecuencia.

Aleaciones de níquel-hierro: aleaciones magnéticas blandas de alta permeabilidad que se utilizan en aplicaciones eléctricas en las que se requiere alta sensibilidad: audio y transformadores de instrumentos, entre otras. Dos composiciones básicas que se usan de manera común son 50% Ni-50% Fe y 79% Ni-21% Fe.

Sección 16.9

Material magnético duro: material magnético con alta fuerza coercitiva y una alta inducción por saturación.

Producto de energía máximo $(BH)_{máx}$: el valor máximo de B veces H en la curva de desmagnetización de un material magnético duro. El valor de $(BH)_{máx}$ tiene unidades del SI de J/m^3.

Aleaciones de alnico (aluminio-níquel-cobalto): familia de aleaciones magnéticas permanentes que tienen la composición básica de Al, Ni y Co, y alrededor de 25 a 50 por ciento de Fe. Se añade una pequeña cantidad de Cu y Ti a algunas de estas aleaciones.

Recocido magnético: el tratamiento térmico de un material magnético en un campo magnético que alinea parte de la aleación en la dirección del campo aplicado. Por ejemplo, el precipitado α' en la aleación de alnico 5 se elonga y alinea mediante este tipo de tratamiento térmico.

Aleaciones de tierras raras: familia de aleaciones magnéticas permanentes con productos de energía extremadamente altos. $SmCo_5$ y $Sm(Co, Cu)_{7.4}$ son las composiciones comerciales más importantes de estas aleaciones.

Aleaciones de hierro-cromo-cobalto: familia de aleaciones magnéticas permanentes que contienen alrededor de 30% de Cr con el 10 a 23% de Co y el hierro de balance. Estas aleaciones tienen la ventaja de que pueden conformarse en frío a temperatura ambiente.

Sección 16.10

Ferritas blandas: compuestos cerámicos con la fórmula general $MO \cdot Fe_2O_3$, donde M es un ion divalente como Fe^{2+}, Mn^{2+}, Zn^{2+},o Ni^{2+}. Estos materiales son ferrimagnéticos y aisladores y por ello pueden utilizarse en núcleos de transformador de alta frecuencia.

Estructura de espinela normal: compuestos cerámicos que tienen la fórmula general $MO \cdot M_2O_3$. Los iones de oxígeno en este compuesto forman una retícula FCC, con los iones M^{2+} ocupando sitios intersticiales tetraédricos y los iones M^{3+} ocupando sitios octaédricos.

Estructura de espinela inversa: compuestos cerámicos que tienen la fórmula general $MO \cdot M_2O_3$. Los iones de oxígeno en este compuesto forman una retícula FCC, con los iones M^{2+} ocupando sitios octaédricos y los iones M^{3+} en los sitios tanto octaédricos como tetraédricos.

Ferritas duras: materiales magnéticos permanentes cerámicos. La familia más importante de estos materiales tiene la composición básica $MO \cdot Fe_2O_3$, donde M es un ion de bario (Ba) o un ion de estroncio (Sr). Estos materiales tienen una estructura hexagonal y son de bajo costo y baja densidad.

16.13 PROBLEMAS

Las respuestas a los problemas marcados con un asterisco se encuentran al final del libro.

16.1 ¿Qué elementos son sumamente ferromagnéticos a temperatura ambiente?

16.2 ¿Cómo puede revelarse un campo magnético alrededor de una barra de hierro magnetizada?

16.3 ¿Cuáles son las unidades del SI y cgs para la intensidad del campo magnético H?

16.4 Defina la inducción magnética B y la magnetización M.

16.5 ¿Cuál es la relación entre B y H?

16.6 ¿Cuál es la constante de permeabilidad del vacío μ_0?

16.7 ¿Cuáles son las unidades de SI para B y M?

16.8 Escriba una ecuación que relacione B, H y M, utilizando unidades del SI.

16.9 ¿Por qué la relación $B \approx \mu_0 M$ se usa a menudo en los cálculos de propiedades magnéticas?

16.10 Defina la permeabilidad magnética y la permeabilidad magnética relativa.

16.11 ¿La permeabilidad magnética de un material ferromagnético es una constante? Explique.

16.12 ¿Qué cantidades de la permeabilidad magnética se especifican con frecuencia?

16.13 Defina la susceptibilidad magnética. ¿En qué situación se emplea a menudo esta cantidad?

16.14 Describa dos mecanismos que involucran electrones mediante los cuales se crean campos magnéticos.

16.15 Defina el diamagnetismo. ¿Cuál es el orden de magnitud de la susceptibilidad magnética de los materiales diamagnéticos a 20°C?

16.16 Defina paramagnetismo. ¿Cuál es el orden de magnitud de la susceptibilidad magnética de materiales paramagnéticos a 20°C?

16.17 Defina ferromagnetismo. ¿Qué elementos son ferromagnéticos?

16.18 ¿Qué causa el ferromagnetismo en Fe, Co y Ni?

16.19 ¿Cuántos electrones 3d no apareados hay por átomo en Cr, Mn, Fe, Co, Ni y Cu?

16.20 ¿Qué son los dominios magnéticos?

16.21 ¿Cómo afecta la energía de intercambio positiva el alineamiento de dipolos magnéticos en materiales ferromagnéticos?

16.22 ¿Cuál es la explicación que se da al hecho de que Fe, Co y Ni son ferromagnéticos y Cr y Mn no lo son, aun cuando todos estos elementos tienen electrones 3d no apareados.

***16.23** Calcule un valor teórico para la magnetización por saturación y la inducción por saturación del níquel, suponiendo que todos los electrones 3d no apareados contribuyen a la magnetización. (Ni es FCC y $a = 0.352$ nm.)

***16.24** Calcule un valor teórico para la magnetización por saturación cobalto metálico puro suponiendo que todos los electrones 3*d* no apareados contribuyen a la magnetización. (Co es HCP con $a = 0.25071$ nm y $c = 0.40686$ nm.)

16.25 Calcule un valor teórico de la magnetización por saturación de gadolinio puro debajo de 16°C suponiendo que todos los siete electrones 4*f* no apareados contribuyen a la magnetización. (Gd es HCP con $a = 0.364$ nm y $c = 0.578$ nm.)

16.26 El cobalto tiene una magnetización de saturación de 1.42×10^6 A/m. ¿Cuál es el momento magnético promedio en el magnetón de Bohr por átomo?

16.27 El níquel tiene un promedio de 0.604 magnetones de Bohr/átomo. ¿Cuál es la inducción por saturación?

16.28 El gadolinio a temperaturas muy bajas tiene un promedio de 7.1 magnetones de Bohr por átomo. ¿Cuál es la magnetización por saturación?

16.29 Defina el antiferromagnetismo. ¿Qué elementos muestran este tipo de comportamiento?

16.30 Defina el ferrimagnetismo. ¿Qué son las ferritas? Dé un ejemplo de un compuesto ferrimagnético.

16.31 ¿Qué efecto tiene el incremento de la temperatura arriba de 0 K sobre el alineamiento de dipolos magnéticos en materiales ferromagnéticos?

16.32 ¿Qué es la temperatura de Curie?

16.33 ¿Cómo puede un material ferromagnético desmagnetizarse? ¿Cuál es el arreglo de los dominios magnéticos en un material ferromagnético desmagnetizado?

16.34 Cuando un material ferromagnético desmagnetizado se magnetiza lentamente mediante un campo magnético aplicado, ¿qué cambios ocurren primero en la estructura del dominio?

16.35 Después de que ha terminado el crecimiento de dominios debido a la magnetización de un material ferromagnético por medio de un campo aplicado, ¿qué cambio ocurre en la estructura del dominio con un aumento adicional sustancial en el campo aplicado?

16.36 ¿Qué cambios ocurren en la estructura del dominio en un material ferromagnético cuando el campo aplicado que magnetiza a una muestra por saturación se suprime?

16.37 ¿Cómo es posible que se revele la estructura de dominios de un material ferromagnético al observarlo en el microscopio óptico?

16.38 ¿Cuáles son los cinco tipos de energías que determinan la estructura del dominio de un material ferromagnético?

16.39 Defina la energía de intercambio magnético. ¿Cómo puede la energía de intercambio de un material ferromagnético minimizarse con respecto al alineamiento de los dipolos magnéticos?

16.40 Defina la energía magnetoestática. ¿Cómo puede minimizarse la energía magnetoestática de una muestra de material ferromagnético?

16.41 Defina la energía de anisotropía magnetocristalina. ¿Cuáles son las direcciones fáciles de magnetización para *a*) Fe y *b*) Ni?

16.42 Defina la energía de la pared del dominio magnético. ¿Cuál es el ancho promedio en términos del número de átomos para una pared del dominio ferromagnético?

16.43 ¿Cuáles energías determinan el ancho de la pared del dominio? ¿Qué energía se minimiza cuando la pared se ensancha? ¿Qué energía se minimiza cuando la pared se hace más estrecha?

16.44 Defina la magnetoestricción y energía magnetoestrictiva. ¿Cuál es la causa de la magnetoestricción en materiales ferromagnéticos?

16.45 ¿Cuáles son los dominios de cierre? ¿Cómo se crean los esfuerzos magnetoestrictivos mediante los dominios de cierre?

16.46 ¿Cómo afecta el tamaño del dominio la energía magnetoestrictiva de una muestra de material ferromagnético magnetizada?

16.47 ¿Cómo afecta el tamaño del dominio la cantidad de energía de la pared del dominio en una muestra?

16.48 Dibuje un ciclo de histéresis *B-H* para un material ferromagnético e indique *a*) la inducción por saturación B_s, *b*) la inducción remanente B_r, *c*) la fuerza coercitiva H_c.

16.49 Describa qué sucede con la inducción magnética cuando se magnetiza, desmagnetiza y remagnetiza un material ferromagnético mediante un campo magnético aplicado.

16.50 ¿Qué sucede con los dominios magnéticos de una muestra de material ferromagnético durante la magnetización y la desmagnetización?

16.51 Defina un material magnético blando y un material magnético duro.

16.52 ¿Qué tipo de ciclo de histéresis tiene un material ferromagnético blando?

16.53 ¿Cuáles son las propiedades magnéticas deseables de un material magnético blando?

16.54 ¿Qué son las pérdidas de energía por histéresis? ¿Qué factores afectan las pérdidas por histéresis?

16.55 ¿Cómo afecta la frecuencia de CA las pérdidas por histéresis de materiales ferromagnéticos blandos. Explique.

16.56 ¿Qué son las corrientes parásitas? ¿Cómo se crean en materiales ferromagnéticos?

16.57 ¿Cómo pueden reducirse las corrientes parásitas en núcleos de transformador magnéticos metálicos?

16.58 ¿Por qué la adición de 3 a 4 por ciento de silicio a hierro reduce las pérdidas de energía en el núcleo de transformador?

16.59 ¿Cuáles son las desventajas de la adición de silicio a hierro en materiales del núcleo de transformadores?

16.60 ¿Por qué la estructura laminada aumenta la eficiencia eléctrica de un transformador eléctrico?

16.61 ¿Por qué el acero de placa de transformador de hierro-silicio y grano orientado aumenta la eficiencia de un núcleo de transformador?

16.62 ¿Cuál es la estructura de un vidrio metálico? ¿Cómo se producen las tiras de vidrio magnético?

16.63 ¿Cuáles son algunas propiedades especiales de los vidrios metálicos?

16.64 ¿Por qué los vidrios metálicos magnéticos se magnetizan y desmagnetizan con facilidad?

16.65 ¿Cuáles son las ventajas de vidrios metálicos en transformadores eléctricos? ¿Cuáles son las desventajas?

***16.66** Calcule el porcentaje en peso de los elementos en el vidrio metálico con la composición porcentual atómica $Fe_{78}B_{13}Si_9$.

16.67 ¿Cuáles son las ventajas en la ingeniería del uso de aleaciones de níquel-hierro para aplicaciones eléctricas?

16.68 ¿Qué composiciones de las aleaciones de Ni-Fe son especialmente importantes en las aplicaciones eléctricas?

16.69 ¿Cómo afecta el orden en las propiedades magnéticas de una aleación de 78.5% de Ni-21.5% de Fe? ¿Cómo puede prevenirse el ordenamiento?

16.70 ¿Cómo aumenta el recocido magnético las propiedades magnéticas de una aleación de 65% de Ni-35% de Fe?

16.71 ¿Cuáles son las propiedades magnéticas importantes para un material magnético duro?

16.72 ¿Cuál es el producto de energía máximo para un material magnético duro? ¿Cómo se calcula? ¿Cuáles son las unidades del SI y cgs del producto de energía?

16.73 Calcule el producto de energía máxima para la aleación magnética dura de tierra rara $SmCo_5$ (curva 2) de la figura 16.24.

16.74 Calcule el producto de energía máxima para la aleación alnico 5 (curva 4) de la figura 16.24.

16.75 De manera aproximada, ¿cuánta energía en kilojoules por metro cúbico se requiere para desmagnetizar un bloque de aleación de alnico 8 de 2 cm^3 completamente magnetizado?

16.76 ¿Qué elementos se incluyen en los materiales magnéticos de alnico?

16.77 ¿Cuáles son los dos procesos que se usan para producir imanes permanentes de alnico?

16.78 ¿Cuál es la estructura básica de un material magnético de alnico 8?

16.79 ¿Cómo afecta la precipitación en un campo magnético, la forma de los precipitados en una aleación de alnico 8? ¿Cómo afecta la forma de los precipitados la coercitividad de este material?

16.80 ¿Cuál es el origen del ferromagnetismo en aleaciones magnéticas de tierras raras?

16.81 ¿Cómo se comparan los productos de energía máximos de los alnicos con los de las aleaciones magnéticas de tierras raras?

16.82 ¿Cuáles son los dos principales grupos de las aleaciones de tierras raras?

16.83 ¿Cuál es el mecanismo básico de coercitividad que se cree ocurre en las aleaciones magnéticas de $SmCo_5$?

16.84 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de las aleaciones magnéticas de tierras raras?

16.85 ¿Qué ventaja de fabricación tienen las aleaciones magnéticas de Fe-Cr-Co en la fabricación de piezas de aleaciones magnéticas permanentes?

16.86 ¿Cuál es una composición química común de una aleación magnética de Fe-Cr-Co?

16.87 ¿Cuál es la estructura básica de una aleación magnética de Fe-Cr-Co? ¿Cuál es el mecanismo para la coercitividad de las aleaciones magnéticas de tipo Fe-Cr-Co?

16.88 ¿Cómo afecta la deformación plástica antes del tratamiento de envejecimiento final la forma de las partículas precipitadas y la coercitividad de las aleaciones magnéticas de Fe-Cr-Co?

16.89 ¿Para qué tipo de aplicaciones son adecuadas en particular las aleaciones de Fe-Cr-Co?

16.90 ¿Qué son las ferritas? ¿Cómo se producen?

16.91 ¿Cuál es la composición básica de las ferritas blandas cúbicas?

16.92 Describa la celda unitaria de la estructura de espinela $MgO \cdot Al_2O_3$, e incluya los iones que ocupan los sitios intersticiales tetraédricos y octaédricos.

16.93 Describa la celda unitaria de la estructura de espinela inversa, e incluya los iones que ocupan los sitios intersticiales tetraédricos y octaédricos.

16.94 ¿Cuál es el momento magnético neto por molécula para cada una de las siguientes ferritas?:
a) $FeO \cdot Fe_2O_3$, *b*) $NiO \cdot Fe_2O_3$,y *c*) $MnO \cdot Fe_2O_3$?

16.95 Calcule la magnetización por saturación teórica en amperes por metro y la inducción por saturación en teslas para la ferrita $NiO \cdot Fe_2O_3$ ($a = 0.834$ nm para $NiO \cdot Fe_2O_3$).

16.96 ¿Cuáles son las composiciones de dos ferritas que se usan más comúnmente? ¿Cuáles son las mezclas de las ferritas utilizadas en lugar de una sola ferrita pura?

16.97 ¿Por qué es necesaria una resistividad eléctrica alta para un material magnético que se usa en un núcleo de transformador que opera a una alta frecuencia?

16.98 ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones industriales de las ferritas blandas?
16.99 ¿Por qué las memorias de núcleo magnético son útiles en particular para las aplicaciones de resistencia a grandes impactos?
16.100 ¿Cuál es la composición básica de las ferritas duras hexagonales?
16.101 ¿Cuáles son las ventajas de las ferritas duras para uso industrial?
16.102 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de los materiales magnéticos de ferritas duras?

16.14 PROBLEMAS EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

1. Dibuje la estructura electrónica del orbital 3*d* de metales de transición empezando desde el Sc y terminando con el Cu. Con base en sus diagramas, compare los momentos magnéticos resultantes.

2. Repita el problema 1 para los orbitales 5*d* de metales de transición desde La hasta Au.

3. Los metales amorfos han demostrado ser una elección atractiva para los materiales del núcleo de transformadores. *a*) Explique qué es un metal amorfo. *b*) Dé razones de su competitividad.

4. *a*) ¿Qué propiedades deben tener los materiales seleccionados para una grabadora de cabezas magnéticas? *b*) Seleccione un material para esta aplicación.

5. Puede lograrse una magnetización extremadamente rápida produciendo películas magnéticas delgadas sobre sustratos no magnéticos. *a*) Proponga un proceso con el que lograría esta estructura. *b*) ¿Por qué es importante que la película magnética sea delgada? *c*) Dé ejemplos de materiales que se utilizan en la elaboración de cintas y películas magnéticas.

6. ¿Qué tipos de magnetos elegiría usted para construir polos magnéticos permanentes para alternadores y motores? Dé un ejemplo específico.

7. ¿Seleccionaría usted un material magnético blando o duro para usarse en un núcleo de transformador? ¿Por qué?

8. La magnetización de la ferrita de níquel, $NiFe_2O_4$, se debe a iones de níquel puesto que los iones férricos se acoplan antiferromagnéticamente. Si se agrega zinc a la ferrita de níquel, la magnetización del cristal aumenta aunque los iones de zinc no sean por sí solos ferromagnéticos. Explique por qué aumenta la magnetización.

APENDICE I

Propiedades importantes de materiales de ingeniería seleccionados

1. VALORES DE DENSIDAD A TEMPERATURA AMBIENTE

		Densidad	
		g/cc	lb/pulg^3
Aceros al carbón y de baja aleación			
Aleación 1006			
	Trefilada en frío	7.872	0.284
	Laminada en caliente	7.872	0.284
Aleación 1020			
	Laminada en frío	7.87	0.284
	Recocida	7.87	0.284
Aleación 1040			
	Trefilada en frío	7.845	0.283
	Recocida	7.845	0.283
Aleación 1090			
	Recocida	7.85	0.284
	Laminada en caliente	7.87	0.284
Aleación 4027			
	Recocida	7.85	0.284
	Normalizada	7.85	0.284
Aleación 4140			
	Recocida	7.85	0.284
	Normalizada	7.85	0.284
Aleación 4340			
	Recocida	7.85	0.284
	Normalizada	7.85	0.284
Aleación 5140			
	Recocida	7.85	0.284
	Normalizada	7.85	0.284

(*continúa*)

Aceros inoxidables			
Aleación 302			
	Recocida	7.86	0.284
	Laminada en frío	7.86	0.284
Aleación 316			
	Recocida	8	0.289
	Revenida reblandecida	8	0.289
Aleación 405			
	Laminada en frío	7.8	0.282
	Recocida	7.8	0.282
Aleación 434			
	Recocida	7.8	0.282
Aleación 660			
	Laminada en frío	7.92	0.286
Aleación 17-7PH			
	Laminada en frío	7.8	0.282
Hierros fundidos			
Fundición gris (tal cual)			
	ASTM clase 20	7.15	0.258
	ASTM clase 35	7.15	0.258
Hierros fundidos dúctiles			
	Grado 60-40-18	7.15	0.258
	Grado 120-90-02	7.15	0.258
Aleaciones de aluminio			
Aleación 2024			
	Recocida	2.78	0.1
	Con tratamiento T3	2.78	0.1
	Con tratamiento T6	2.78	0.1
Aleación 6061			
	Recocida	2.7	0.0975
	Con tratamiento T4	2.7	0.0975
	Con tratamiento T6	2.7	0.0975
Aleación 7075			
	Recocida	2.81	0.102
	Con tratamiento T6	2.81	0.102
Aleaciones de cobre			
Cobre electrolítico bien refinado, (C11000)			
	Trabajado en frío	8.89	0.321
Berilio cobre, (C17000)			
	Con tratamiento TH04	8.26	0.298
	Con tratamiento TH01	8.26	0.298
Latón en cartucho, (C26000)			
	Con tratamiento H00	8.53	0.308
	Con tratamiento H04	8.53	0.308
Metal de Muntz, (C28000)			
	Con tratamiento H00	8.39	0.303
	Con tratamiento H02	8.39	0.303

(*continúa*)

Latón de maquinado rápido, (C36000)			
	Con tratamiento H01	8.5	0.307
	Con tratamiento H02	8.5	0.307
Cromo cobre, (C18500)			
	Con tratamiento TH04	8.89	0.321
	Con tratamiento TH04	8.89	0.321
Bronce 90-10, (C22000)			
	Con tratamiento H01	8.8	0.318
	Con tratamiento H04	8.8	0.318
Aleaciones de magnesio			
Aleación AZ31B			
	Recocida	1.77	0.0639
	Laminada dura	1.77	0.0639
Aleación AZ63			
	Con tratamiento F	1.83	0.0661
	Con tratamiento T6	1.83	0.0661
Aleación AZ91E			
	Con tratamiento F	1.81	0.0654
	Con tratamiento T4	1.81	0.0654
Aleaciones de níquel			
Níquel-comercialmente puro			
	Tal como salió de la fundición	8.88	0.321
	Recocido	8.88	0.321
Níquel plata 65-18 (752)			
	Recocido	8.7	0.314
	Endurecido	8.7	0.314
Cuproníquel 30(715)			
	Recocido	8.92	0.322
	Endurecido	8.92	0.322
Aleaciones de titanio			
Titanio-comercialmente puro			
	Al fundirse	4.5	0.163
AleaciónTi-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo			
	Al laminarse	4.48	0.162
	Recocida	4.48	0.162
Aleaciones misceláneas			
	Aleación kovar	8.36	0.302
Invar			
	Aleación 32-5 (trefilada en frío)	8.14	0.294
	Aleación 36 (trefilada en frío)	8.05	0.291
Haynes 25			
	Laminada y recocida en frío	9.13	0.33
	Laminada y recocida en caliente	9.13	0.33
Biodur			
	Trabajada en caliente	8.28	0.299
	Recocida	8.287	0.299
	Aleación de Co-Cr-Ni	8.3	0.3

(*continúa*)

	INCONEL (laminada en frío)	8.05	0.291
	INCOLOY 903	8.25	0.298
	INCONEL 725 (recocida)	8.3	0.3
	Berilio S-200	1.844	0.0666
	Tungsteno	19.3	0.697
	Tantalio	16.6	0.6
	Zinc	7.1	0.257
	Metales nobles		
	Oro	19.32	0.698
	Iridio	22.65	0.818
	Plata	10.491	0.379
	Platino, recocido	21.45	0.775
	Polímeros		
Elastómeros			
	Hule estireno-butadieno (HSB)	0.93	0.0336
	Hule natural (no vulcanizado)	0.93	0.0336
	Hule de nitrilo	1.25	0.0452
Resinas epóxicas			
	Resina epóxica (no reforzada)	1.2	0.0434
	Nailon 66 (no reforzado)	1.095	0.0396
	Resina fenólica (no reforzada)	1.705	0.0695
	Tereftalato de polibutileno (PBT)	1.355	0.049
Policarbonato (PC)			
	Moldeado	1.31	0.0474
	Conductor	1.31	0.0474
	Poliéster (rígido)	1.65	0.0597
Polieteretercetona (PEEC)			
	Relleno con fibra de vidrio	1.475	0.0533
	Relleno con fibra de carbón	1.436	0.0519
Polietilentereftalato (PET)			
	No reforzado	1.315	0.0475
	Reforzado con 30% de vidrio	1.595	0.0577
Polietileno (moldeado)			
	Densidad baja	0.925	0.0345
	Densidad media	0.938	0.0339
	Densidad alta	1.159	0.0419
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)			
	Moldeado	1.115	0.0403
	Relleno con 40% de fibra de vidrio	1.4275	0.0516
	Relleno con 40% de fibra de carbón	1.305	0.0472
Polimetilmetacrilato (PMMA)			
	No reforzado	1.17	0.0423
	Reforzado con fibra de vidrio	1.445	0.0522
Polipropileno (PP)			
	No reforzado	1.07	0.0387
	Relleno con 10% de fibra de vidrio	1.18	0.0427
	Relleno con 10% de fibra de carbón	0.95	0.0343
	Poliestireno	1.06	0.0381
	Politetrafluoroetileno (PTFE)	2.225	0.0804

(*continúa*)

Policloruro de vinilo (PVC)			
	No reforzado	1.305	0.0472
	Reforzado con 30% de fibra de vidrio	1.58	0.0571
	Acrilonitrilo-estireno	1.16	0.042
	Acetato de celulosa	1.28	0.0463
	Acrilonitrilo	1.3	0.047
	Poliacetal	1.39	0.0502
	Sulfuro de polifenileno moldeado	1.57	0.0567
	Polisulfona	1.245	0.045
Cerámicas, grafito y materiales semiconductores			
Óxido de aluminio			
	Alumina a 99.9%	3.96	0.143
	Alumina a 95%	3.68	0.1325
	Concreto	1.28	0.0463
Diamante			
	Natural	3.515	0.127
	Sintético	3.36	0.1215
	Arsenuro de galio	5.316	0.192
Vidrio			
	Vidrio de borosilicato	2.4	0.0867
	Vidrio de sílice	2.18	0.0788
	Carbón de grafito	2.25	0.0813
	Sílice fundida	1.855	0.067
Carburo de silicio			
	Sinterizado	3.1	0.112
	Sublimado	3.186	0.115
	Nitruro de silicón	3.2	0.116
	Zirconia	5.68	0.205
	Carburo de titanio	4.94	0.178
	Carburo de tungsteno	15.7	0.567
	Carburo de zirconio	6.56	0.237
	Alumina a 96%	3.8	0.137
	Nitruro de boro	3.48	0.125
	Cloruro de sodio	2.17	0.0784
	Fluoruro de calcio	3.18	0.115
Fibras			
	Fibra de vidrio genérica E	2.57	0.0929
	Fibra de vidrio genérica C	2.54	0.0918
	Precursor de fibra de carbón	1.81	0.0654
Materiales compuestos			
	Epoxi/vidrio CMC	1.635	0.0591
	Epoxi/compuesto de fibra de carbón	1.53	0.0553
	Policarbonato reforzado con fibra de aramida	1.27	0.0459
	Nailon 6/6 reforzado con fibra de aramida	1.22	0.0441
	Policarbonato reforzado con fibra de carbón	1.3	0.047
	Policarbonato reforzado con carbón + fibra de vidrio	1.377	0.0498
	Policarbonato claro reforzado con 30% de fibra de vidrio	1.43	0.0517

(*continúa*)

Madera		
Madera de maple rojo americano	0.801	0.0289
Madera de chicle rojo americano	0.801	0.0289
Madera de cedro alaska americano	0.6	0.0216
Madera de secoya americana	0.4	0.0145
Madera de roble rojo americano	0.21	0.0076
Madera de roble blanco	0.993	0.0359

2. DUREZA DE MATERIALES A TEMPERATURA AMBIENTE

Materiales		Dureza (Brinell a menos que se especifique)
Aceros al carbón y de baja aleación		
Aleación 1006		
	Trefilada en frío	95
	Laminada en caliente	86
Aleación 1020		
	Laminada en frío	121
	Recocida	111
Aleación 1040		
	Trefilada en frío	170
	Recocida	149
Aleación 1090		
	Recocida	197
	Laminada en caliente	248
Aleación 4027		
	Recocida	143
	Normalizada	179
Aleación 4140		
	Recocida	197
	Normalizada	302
Aleación 4340		
	Recocida	217
	Normalizada	363
Aleación 5140		
	Recocida	167
	Normalizada	229
Aceros inoxidables		
Aleación 302		
	Recocidos	147
Aleación 316		
	Recocidos	143
Aleación 405		
	Recocidos	150

(*continúa*)

Aleación 434		
	Recocida	164
Aleación 17-7PH		
	Laminada en frío	378
	Hierros fundidos	
Fundición gris (tal cual)		
	ASTM clase 20	156
	ASTM clase 35	212
Hierros fundidos dúctiles		
	Grado 60-40-18	167
	Grado 120-90-02	331
	Aleaciones de aluminio	
Aleación 2024		
	Con tratamiento T3	120
	Con tratamiento T6	125
Aleación 6061		
	Recocida	30
	Con tratamiento T4	65
	Con tratamiento T6	95
Aleación 7075		
	Recocida	60
	Con tratamiento T6	150
	Aleaciones de cobre	
Cobre electrolítico bien refinado, (C11000)		
	Trabajada en frío	95
Berilio cobre, (C17000)		
	Con tratamiento TH04	353
	Con tratamiento TH01	320
Latón para cartucho, (C26000)		
	Con tratamiento H00	109
	Con tratamiento H04	154
Metal de Muntz (C28000)		
	Con tratamiento H00	102
	Con tratamiento H02	135
Latón de maquinado rápido, (C36000)		
	Con tratamiento H01	112
	Con tratamiento H02	143
Cromo cobre, (C18500)		
	Con tratamiento TH04	154
	Con tratamiento TH04	160
Bronce 90-10, (C22000)		
	Con tratamiento H01	86
	Con tratamiento H04	125
	Aleaciones de magnesio	
Aleación AZ31B		
	Recocida	56
	Laminada dura	73
Aleación AZ63		
	Con tratamiento F	50
	Con tratamiento T6	73

(*continúa*)

Aleación AZ91E		
	Con tratamiento F	63
	Con tratamiento T4	55
Aleaciones de níquel		
Níquel-comercialmente puro		
	Recocido	79
Níquel plata 65-18 (752)		
	Recocido	75
	Endurecido	151
Cuproníquel 30(715)		
	Recocido	83
	Endurecido	147
Aleaciones de titanio		
Titanio-comercialmente puro		
	Al fundirse	70
Aleación Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo		
	Al laminarse	290
	Recocida	290
Aleaciones misceláneas		
	Aleación kovar	120
Invar		
	Aleación 32-5 (trefilada en frío)	135
	Aleación 36 (trefilada en frío)	184
Biodur		
	Trabajada en caliente	400
	Recocida	290
	Aleación de Co-Cr-Ni	192
	INCONEL 725 (recocida)	170
	Tungsteno	294
Metales nobles		
	Oro	25(Vickers)
	Iridio	565
	Plata	25(Vickers)
	Platino, recocido	40(Vickers)
Polímeros		
Elastómeros		
	Hule de butadieno de estireno (UBS)	71(Shore-A)
	Hule natural (no vulcanizado)	60(Shore-A)
	Hule de nitrilo	65(Shore-A)
Resinas epóxicas		
	Resina epóxica (no reforzada)	95R(Rockwell-M)
	Nailon 66 no reforzado	76R(Rockwell-M)
	Resina fenólica (no reforzada)	110
	Tereftalato de polibutileno (PBT)	81(Rockwell-M)

(*continúa*)

Policarbonato (PC)		
	Moldeado	70(Rockwell-M)
	Conductivo	110(Rockwell-R)
	Poliéster (rígido)	90(Rockwell-M)
Polieteretercetona (PEEC)		
	Relleno de fibra de vidrio	101(Rockwell-M)
	Relleno de fibra de carbón	96(Rockwell-M)
Polietilentereftalato (PET)		
	No reforzado	95(Rockwell-M)
	Reforzado con 30% de vidrio	87(Rockwell-M)
Polietileno (moldeado)		
	Densidad baja	60(Rockwell-R)
	Densidad media	59(Shore-D)
	Densidad alta	62(Rockwell-R)
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)		
	Moldeado	103(Rockwell-R)
	Relleno con 40% de fibra de vidrio	110(Rockwell-R)
	Relleno con 40% de fibra de carbón	110(Rockwell-R)
Polimetilmetacrilato (PMMA)		
	No reforzado	85(Rockwell-M)
	Reforzado con fibra de vidrio	110(Rockwell-R)
Polipropileno (PP)		
	No reforzado	92(Rockwell-R)
	Relleno con 10% de fibra de vidrio	96(Rockwell-R)
	Poliestireno	72(Rockwell-m)
	Politetrafluoroetileno (PTFE)	58(Rockwell-R)
Policloruro de vinilo (PVC)		
	Sin reforzar	99(Rockwell-R)
	Reforzado con 30% de fibra de vidrio	108(Rockwell-R)
	Acrilonitrilo-estireno	84(Rockwell-M)
	Acetato de celulosa	70(Rockwell-R)
	Acrilonitrilo	60(Rockwell-M)
	Poliacetal	78(Rockwell-M)
	Sulfuro de polifenileno moldeado	90(Rockwell-M)
	Polisulfona	81(Rockwell-M)
Cerámicas, grafito y materiales semiconductores		
Óxido de aluminio		
	Alumina a 99.9%	1365(Vickers)
	Alumina a 95%	1720(Vickers)
Diamante		
	Natural	10(Mohs)
	Sintético	10(Mohs)
	Arsenuro de galio	7500(Knoop)
Vidrio		
	Vidrio de borosilicato	2(Knoop)
	Vidrio de sílice	443
	Nitruro de silicio	1600(Vickers)
	Carburo de titanio	3200(Vickers)
	Carburo de tungsteno	800
	Carburo de zirconio	2600(Vickers)
	Nitruro de boro	279
	Fluoruro de calcio	154

(*continúa*)

Materiales compuestos		
	Policarbonato reforzado con fibra de aramida	120(Rockwell-R)
	Policarbonato reforzado con fibra de carbón	119(Rockwell-R)
	Policarbonato claro reforzado con 30% de fibra de vidrio	121(Rockwell-R)
Madera		
	Madera de maple rojo americano	3(Indentación de madera)
	Madera de chicle rojo americano	2.5(Indentación de madera)
	Madera de cedro alaska americano	2(Indentación de madera)
	Madera de secoya americana	2.1(Indentación de madera)
	Madera de roble rojo americano	4.3(Indentación de madera)
	Madera de roble blanco	4.8(Indentación de madera)

3. RESISTENCIA ÚLTIMA A LA TENSIÓN A TEMPERATURA AMBIENTE

		Resistencia última a la tensión	
Materiales		**Mpa**	**Ksi**
Aceros al medio carbón y de baja aleación			
Aleación 1006			
	Trefilada en frío	330	47.85
	Laminada en caliente	295	42.775
Aleación 1020			
	Laminada en frío	420	60.9
	Recocida	395	57.275
Aleación 1040			
	Trefilada en frío	585	84.825
	Recocida	515	74.675
Aleación 1090			
	Recocida	696	100.92
	Laminada en caliente	841	121.945
Aleación 4027			
	Recocida	515	74.675
	Normalizada	640	92.8
Aleación 4140			
	Recocida	655	94.975
	Normalizada	1020	147.9
Aleación 4340			
	Recocida	745	108.025
	Normalizada	1282	185.89
Aleación 5140			
	Recocida	570	82.65
	Normalizada	793	114.985

(*continúa*)

Aceros inoxidables			
Aleación 302			
	Recocida	620	89.9
	Laminada en frío	585	84.825
Aleación 316			
	Recocida	580	84.1
	Tratada para reblandecerla	689	99.905
Aleación 405			
	Laminada en frío	469	68.005
	Recocida	448	64.96
Aleación 434			
	Recocida	517	74.965
Aleación 660			
	Laminada en frío	1007	146.015
Aleación 17-7PH			
	Laminada en frío	1380	200.1
Hierros fundidos			
Fundición gris (tal cual)			
	ASTM clase 20	152	22.04
	ASTM clase 35	252	36.54
Hierros fundidos dúctiles			
	Grado 60-40-18	461	66.845
	Grado 120-90-02	974	141.23
Aleaciones de aluminio			
Aleación 2024			
	Tratada con T3	483	70.035
	Tratada con T6	427	61.915
Aleación 6061			
	Recocida	124	17.98
	Tratada con T4	241	34.945
	Tratada con T6	310	44.95
Aleación 7075			
	Recocida	228	33.06
	Tratada con T6	572	82.94
Aleaciones de cobre			
Cobre electrolítico bien refinado, (C11000)			
	Trabajado en frío	345	50.025
Berilio cobre, (C17000)			
	Tratado con TH04	1310	189.95
	Tratado con TH01	1190	172.55
Latón para cartucho, (C26000)			
	Tratado con H00	400	58
	Tratado con H04	525	76.125
Metal de Muntz, (C28000)			
	Tratado con H00	415	60.175
	Tratado con H02	485	70.325

(*continúa*)

Latón de maquinado rápido, (C36000)			
	Tratado con H01	385	55.825
	Tratado con H02	400	58
Cromo cobre, (C18500)			
	Tratado con TH04	530	76.85
	Tratado con TH04	475	68.875
Bronce 90-10, (C22000)			
	Tratado con H01	310	44.95
	Tratado con H04	420	60.9
	Aleaciones de magnesio		
Aleación AZ31B			
	Recocida	255	36.975
	Laminada dura	290	42.05
Aleación AZ63			
	Tratado con F	200	29
	Tratado con T6	275	39.875
Aleación AZ91E			
	Tratado con F	165	23.925
	Tratado con T4	275	39.875
	Aleaciones de níquel		
Níquel-comercialmente puro			
	Al fundirse	317	45.965
	Recocido	45	6.525
Níquel plata 65-18 (752)			
	Recocido	386	55.97
	Endurecido	586	84.97
Cuproníquel 30(715)			
	Recocido	379	54.955
	Endurecido	517	74.965
	Aleaciones de titanio		
Titanio-comercialmente puro			
	Al fundirse	220	31.9
Aleación Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo			
	Al laminarse	830	120.35
	Recocido	830	120.35
	Aleaciones misceláneas		
	Aleación kovar	517	74.965
Invar			
	Aleación 32-5 (extraída en frío)	483	70.035
	Aleación 36 (extraída en frío)	621	90.045
Haynes 25			
	Laminada y recocida en frío	1005	145.725
	Laminada y recocida en caliente	1015	147.175
Biodur			
	Trabajada en caliente	1365	197.925
	Recocida	1035	150.075
	Aleación de Co-Cr-Ni	860	124.7
	INCONEL (laminada en frío)	757	109.765

(*continúa*)

	INCOLOY 903	1310	189.95
	INCONEL 725 (recocida)	855	123.975
	Berilio S-200	765	110.925
	Tungsteno	980	142.1
	Tantalio	689	99.905
	Zinc	37	5.365
	Metales nobles		
	Oro	120	17.4
	Iridio	2000	290
	Plata	140	20.3
	Platino, recocido	145	21.025
	Polímeros		
Elastómeros			
	Hule de butadieno de estireno (UBS)	30	4.35
	Hule natural (no vulcanizado)	28	4.06
	Hule de nitrilo	17	2.465
Resinas epóxicas			
	Resina epóxica (no reforzada)	70	10.15
	Nialon 66 no reforzado	62	8.99
	Resina fenólica (no reforzada)	56	8.12
	Tereftalato de polibutileno (PB)	55	7.975
Policarbonato (PC)			
	Moldeado	65	9.425
	Conductivo	86	12.47
	Poliéster (rígido)	58	8.41
Polieteretercetona (PEEC)			
	Relleno de fibra de vidrio	140	20.3
	Relleno de fibra de carbón	176	25.52
Polietilentereftalato (PET)			
	No reforzado	55	7.975
	Reforzado con 30% de vidrio	137	19.865
Polietileno (moldeado)			
	Densidad baja	16	2.32
	Densidad media	25	3.625
	Densidad alta	30	4.35
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)			
	Moldeado	47	6.815
	Relleno con 40% de fibra de vidrio	80	11.6
	Relleno con 40% de fibra de carbón	115	16.675
Polimetilmetacrilato (PMMA)			
	No reforzado	62	8.99
	Reforzado con fibra de vidrio	107	15.515
Polipropileno (PP)			
	No reforzado	50	7.25
	Relleno con 10% de fibra de vidrio	36	5.22
	Relleno con 10% de fibra de carbón	26	3.77
	Poliestireno	45	6.525
	Politetrafluoroetileno (PTFE)	25	3.625

(*continúa*)

Policloruro de vinilo (PVC)			
	No reforzado	47	6.815
	Reforzado con 30% de fibra de vidrio	90	13.05
	Acrilonitrilo-estireno	65	9.425
	Acetato de celulosa	33	4.785
	Acrilonitrilo	66	9.57
	Poliacetal	60	8.7
	Sulfuro de polifenileno moldeado	95	13.775
	Polisulfona	73	10.585
Cerámicas, grafito y materiales semiconductores			
Óxido de aluminio			
	Alumina a 99.9%	300	43.5
	Alumina a 95%	205	29.725
Diamante			
	Natural	1050	152.25
	Sintético	1200	174
	Arseniuro de galio	66	9.57
Vidrio			
	Vidrio de borosilicato	57	8.265
	Vidrio de sílice	69	10.005
	Sílice fundida	104	15.08
Carburo de silicio			
	Sinterizado	300	43.5
	Nitruro de silicio	800	116
	Carburo de titanio	258	37.41
	Carburo de tungsteno	344	49.88
	Carburo de zirconio	89	12.905
	Alumina a 96%	200	29
	Nitruro de boro	47	6.815
Fibras			
	Fibra de vidrio E genérica	3448	499.96
	Fibra de vidrio C genérica	3310	479.95
	Precursor de fibra de carbón	5650	819.25
Materiales compuestos			
	Epoxi/vidrio CMC	243	35.235
	Epoxi/compuesto de fibra de carbón	1.6	0.232
	Policarbonato reforzado con fibra de aramida	67	9.715
	Nailon 6/6 reforzado con fibra de aramida	119	17.255
	Policarbonato, reforzado con fibra de carbón Reforzada	150	21.75
	Policarbonato reforzado con carbón + fibra de vidrio	135	19.575
Madera			
	Madera de maple rojo americano	4	0.58
	Madera de chicle rojo americano	4	0.58
	Madera de cedro alaska americana	2	0.29
	Madera de secoya americana	2	0.29
	Madera de roble rojo americano	5.5	0.7975
	Madera de roble blanco	6	0.87

4. RESISTENCIA A LA CEDENCIA A TEMPERATURA AMBIENTE

Materiales		Resistencia a la cedencia Mpa	Ksi
Aceros al carbón y de baja aleación			
Aleación 1006			
	Trefilada en frío	285	41.325
	Laminada en caliente	165	23.925
Aleación 1020			
	Laminada en frío	350	50.75
	Recocida	295	42.775
Aleación 1040			
	Trefilada en frío	515	74.675
	Recocida	350	50.75
Aleación 1090			
	Recocida	540	78.3
	Laminada en caliente	460	66.7
Aleación 4027			
	Recocida	325	47.125
	Normalizada	420	60.9
Aleación 4140			
	Recocida	415	60.175
	Normalizada	655	94.975
Aleación 4340			
	Recocida	470	68.15
	Normalizada	862	124.99
Aleación 5140			
	Recocida	295	42.775
	Normalizada	470	68.15
Aceros inoxidables			
Aleación 302			
	Recocida	275	39.875
	Laminada en frío	255	36.975
Aleación 316			
	Recocida	290	42.05
	Tratada para reblandecerla	515	74.675
Aleación 405			
	Laminada en frío	276	40.02
	Recocida	276	40.02
Aleación 434			
	Recocida	345	50.025
Aleación 660			
	Laminada en frío	703	101.935
Aleación 17-7PH			
	Laminada en frío	1210	175.45
Hierros fundidos			
Hierros fundidos dúctiles			
	Grado 60-40-18	329	47.705
	Grado 120-90-02	864	125.28

(*continúa*)

Aleaciones de aluminio			
Aleación 2024			
	Con tratamiento T3	345	50.025
	Con tratamiento T6	345	50.025
Aleación 6061			
	Recocida	55	7.975
	Con tratamiento T4	145	21.025
	Con tratamiento T6	276	40.02
Aleación 7075			
	Recocida	103	14.935
	Con tratamiento T6	503	72.935
Aleaciones de cobre			
Cobre electrolítico bien refinado, (C11000)			
	Trabajado en frío	310	44.95
Berilio cobre, (C17000)			
	Tratado con TH04	1150	166.75
	Tratado con TH01	1110	160.95
Latón para cartucho, (C26000)			
	Tratado con H00	315	45.675
	Tratado con H04	435	63.075
Metal de Muntz, (C28000)			
	Tratado con H00	240	34.8
	Tratado con H02	345	50.025
Latón de maquinado rápido, (C36000)			
	Tratado con H01	310	44.95
	Tratado con H02	310	44.95
Cromo cobre, (C18500)			
	Tratado con TH04	450	65.25
	Tratado con TH04	435	63.075
Bronce 90-10, (C22000)			
	Tratado con H01	240	34.8
	Tratado con H04	370	53.65
Aleaciones de magnesio			
Aleación AZ31B			
	Recocida	150	21.75
	Laminada dura	220	31.9
Aleación AZ63			
	Tratado con F	97	14.065
	Tratado con T6	130	18.85
Aleación AZ91E			
	Tratado con F	97	14.065
	Tratado con T4	90	13.05
Aleaciones de níquel			
Níquel-comercialmente puro			
	Tal como salió de la fundición	59	8.555

(*continúa*)

Aleaciones de titanio			
Titanio-comercialmente puro			
	Tal como salió de la fundición	140	20.3
Aleación Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo			
	Al laminarse	760	110.2
	Recocida	710	102.95
Aleaciones misceláneas			
	Aleación kovar	345	50.025
Invar			
	Aleación 32-5 (extraída en frío)	276	40.02
	Aleación 36 (extraída en frío)	483	70.035
Haynes 25			
	Laminada y recocida en frío	475	68.875
	Laminada y recocida en caliente	505	73.225
Biodur			
	Trabajada en caliente	930	134.85
	Recocida	585	84.825
	Aleación de Co-Cr-Ni	520	75.4
	INCONEL (laminada en frío)	383	55.535
	INCOLOY 903	1100	159.5
	INCONEL 725 (recocida)	427	61.915
	Berilio S-200	414	60.03
	Tungsteno	750	108.75
Polímeros			
Resinas epóxicas			
	Resina epóxica (no reforzada)	60	8.7
	Nailon 66 (no reforzado)	63	9.135
	Resina fenólica (no reforzada)	52	7.54
	Tereftalato de polibutileno (PBT)	67	9.715
Policarbonato (PC)			
	Moldeado	65	9.425
	Poliéster (rígido)	70	10.15
Polieteretercetona (PEEC)			
	Relleno de fibra de vidrio	98	14.21
Polietilentereftalato (PET)			
	No reforzado	54	7.83
	Reforzado con 30% de vidrio	141	20.445
Polietileno (moldeado)			
	Densidad baja	16	2.32
	Densidad media	15	2.175
	Densidad alta	16	2.32
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)			
	Moldeado	46	6.67
	Relleno con 40% de fibra de vidrio	110	15.95
	Relleno con 40% de fibra de carbón	120	17.4
Polimetilmetacrilato (PMMA)			
	No reforzado	69	10.005
Polipropileno (PP)			
	No reforzado	28	4.06
	Relleno con 10% de fibra de vidrio	41	5.945
	Poliestireno	46	6.67
	Politetrafluoroetileno (PTFE)	19	2.755

(*continúa*)

Policloruro de vinilo (PVC)			
	No reforzado	38	5.51
	Acrilonitrilo-estireno	65	9.425
	Acetato de celulosa	26	3.77
	Poliacetal	69	10.005
	Sulfuro de polifenileno moldeado	6809	987.305
	Polisulfona	74	10.73
Cerámicas, grafito y materiales semiconductores			
	Policarbonato reforzado con carbón + fibra de vidrio	110	15.95
	Policarbonato claro reforzado con 30% de fibra de vidrio	124	17.98

5. MÓDULO DE ELASTICIDAD A TEMPERATURA AMBIENTE

		Módulo de elasticidad	
Materiales		**Gpa**	**10^6 Psi**
Aceros al carbón y de baja aleación			
Aleación 1006			
	Trefilada en frío	205	29.71
	Laminada en caliente	200	28.99
Aleación 1020			
	Laminada en frío	205	29.71
	Recocida	200	28.99
Aleación 1040			
	Extraída en frío	200	28.99
	Recocida	200	28.99
Aleación 1090			
	Recocida	205	29.71
	Laminada en caliente	200	28.99
Aleación 4027			
	Recocida	205	29.71
	Normalizada	205	29.71
Aleación 4140			
	Recocida	205	29.71
	Normalizada	205	29.71
Aleación 4340			
	Recocida	205	29.71
	Normalizada	205	29.71
Aleación 5140			
	Recocida	205	29.71
	Normalizada	205	29.71
Aceros inoxidables			
Aleación 302			
	Recocida	193	27.97
	Laminada en frío	193	27.97
Aleación 316			
	Recocida	193	27.97
	Tratada para reblandecerla	193	27.97

(*continúa*)

Aleación 405			
	Laminada en frío	200	28.99
	Recocida	200	28.99
Aleación 434			
	Recocida	200	28.99
Aleación 660			
	Laminada en frío	200	28.99
Aleación 17-7PH			
	Laminada en frío	204	29.57
	Hierros fundidos		
Fundición gris (tal cual)			
	ASTM clase 20	83	12.03
	ASTM clase 35	114	16.52
Hierros fundidos dúctiles			
	Gradorado 60-40-18	169	24.49
	Grado 120-90-02	164	23.77
	Aleaciones de aluminio		
Aleación 2024			
	Recocida	73	10.58
	Con tratamiento T3	73	10.58
	Con tratamiento T6	72	10.43
Aleación 6061			
	Recocida	69	10.00
	Con tratamiento T4	69	10.00
	Con tratamiento T6	69	10.00
Aleación 7075			
	Recocida	72	10.43
	Con tratamiento T6	72	10.43
	Aleaciones de cobre		
Cobre electrolítico bien refinado, (C11000)			
	Trabajado en frío	122	17.68
Berilio cobre, (C17000)			
	Con tratamiento TH04	115	16.67
	Con tratamiento TH01	115	16.67
Latón para cartucho, (C26000)			
	Con tratamiento H00	110	15.94
	Con tratamiento H04	110	15.94
Metal de Muntz, (C28000)			
	Con tratamiento H00	105	15.22
	Con tratamiento H02	105	15.22
Latón sin corte, (C36000)			
	Con tratamiento H01	97	14.06
	Con tratamiento H02	97	14.06
Cromo cobre, (C18500)			
	Con tratamiento TH04	130	18.84
	Con tratamiento TH04	130	18.84
Bronce 90-10, (C22000)			
	Con tratamiento H01	115	16.67
	Con tratamiento H04	115	16.67

(*continúa*)

Aleaciones de magnesio			
Aleación AZ31B			
	Recocida	45	6.52
	Laminada dura	45	6.52
Aleación AZ63			
	Con tratamiento F	45	6.52
	Con tratamiento T6	45	6.52
Aleación AZ91E			
	Con tratamiento F	45	6.52
	Con tratamiento T4	45	6.52
Aleaciones de níquel			
Níquel-comercialmente puro			
	Al fundirse	207	30.00
	Recocido	207	30.00
Níquel plata 65-18 (752)			
	Recocido	124	17.97
	Endurecido	124	17.97
Cuproníquel 30(715)			
	Recocido	152	22.03
	Endurecido	152	22.03
Aleaciones de titanio			
Titanio-comercialmente puro			
	Al fundirse	116	16.81
Aleación Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo			
	Al laminarse	117	16.96
	Recocido	115	16.67
Aleaciones misceláneas			
	Aleación kovar	138	20.00
Invar			
	Aleación 32-5 (extraída en frío)	145	21.01
	Aleación 36 (extraída en frío)	148	21.45
Haynes 25			
	Laminada y recocida en frío	225	32.61
	Laminada y recocida en caliente	225	32.61
	Aleación de Co-Cr-Ni	190	27.54
	INCONEL (laminada en frío)	210	30.43
	INCOLOY 903	147	21.30
	INCONEL 725 (recocida)	204	29.57
	Berilio S-200	303	43.91
	Tungsteno	400	57.97
	Tantalio	186	26.96
	Zinc	97	14.06
Metales nobles			
	Oro	77	11.16
	Iridio	524	75.94
	Plata	76	11.01
	Platino, recocido	1711	247.97

(*continúa*)

Polímeros			
Resinas epóxicas			
	Epoxi (no reforzado)	2.25	0.33
	Nailon 66 (no reforzado)	2.1	0.30
	Resina fenólica (no reforzada)	7	1.01
	Tereftalato de polibutileno (TPB)	12	1.74
Policarbonato (PC)			
	Moldeado	2.3	0.33
	Conductivo	5	0.72
	Poliéster (rígido)	3.5	0.51
Polieteretercetona (PEEC)			
	Relleno de fibra de vidrio	21	3.04
	Relleno de fibra de carbón	11	1.59
Polietilentereftalato (PET)			
	No reforzado	2.7	0.39
	Reforzado con 30% de vidrio	10	1.45
Polietileno (moldeado)			
	Densidad baja	0.25	0.04
	Densidad media	0.5	0.07
	Densidad alta	0.9	0.13
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)			
	Moldeado	2.4	0.35
	Relleno con 40% de fibra de vidrio	9	1.30
	Relleno con 40% de fibra de carbón	22	3.19
Polimetilmetacrilato (PMMA)			
	No reforzado	2.9	0.42
	Fibra de vidrio reforzada	9.2	1.33
Polipropileno (PP)			0.00
	No reforzado	2.25	0.33
	Relleno con 10% de fibra de vidrio	3.75	0.54
	Relleno con 10% de fibra de carbón	4.75	0.69
	Poliestireno	3.25	0.47
	Politetrafluoroetileno (PTFE)	0.6	0.09
Policloruro de vinilo (PVC)			
	No reforzado	3.1	0.45
	Reforzado con 30% fibra de vidrio	5	0.72
	Acrilonitrilo-estireno	3.7	0.54
	Acetato de celulosa	1.7	0.25
	Acrilonitrilo	3.6	0.52
	Poliacetal	2.4	0.35
	Sulfuro de polifenileno moldeado	3.5	0.51
	Polisulfona	2.6	0.38
Cerámicas, grafito y materiales semiconductores			
Óxido de aluminio			
	Alumina a 99.9%	370	53.62
	Alumina a 95%	282	40.87
Diamante			
	Natural	950	137.68
	Sintético	865	125.36
	Arseniuro de galio	85.5	12.39

(*continúa*)

Vidrio			
	Vidrio de borosilicato	62	8.99
	Vidrio de sílice	68	9.86
Carburo de silicio			
	Sinterizado	410	59.42
	Sublimado	467	67.68
	Nitruro de silicio	290	42.03
	Carburo de titanio	450	65.22
	Carburo de tungsteno	682	98.84
	Carburo de zirconio	395	57.25
	96% de alumina	300	43.48
	Nitruro de boro	69	10.00
Fibras			
	Fibra de vidrio E genérica	72	10.43
	Fibra de vidrio C genérica	69	10.00
	Precursor de fibra de carbón	290	42.03
Materiales compuestos			
	Epoxi/vidrio SMC	55	7.97
	Epoxi/compuesto de fibra de carbón	225	32.61
	Policarbonato reforzado con fibra de aramida	3.5	0.51
	Nailon 6/6 reforzado con fibra de aramida	9	1.30
	Fibra de policarbonato reforzada con carbón	13	1.88
	Policarbonato reforzado con carbón + fibra de vidrio	10	1.45
Madera			
	Madera de maple rojo americano	11.3	1.64
	Madera de chicle rojo americano	11.31	1.64
	Madera de cedro alaska americana	7.89	1.14
	Madera de secoya americana	9.24	1.34
	Madera de roble rojo americano	12.5	1.81
	Madera de roble blanco	12.6	1.83

6. RELACIÓN DE POISSON A TEMPERATURA AMBIENTE

Materiales		Relación de Poisson
Aceros al carbón y de baja aleación		
Aleación 1006		
	Trefilada en frío	0.29
	Laminada en caliente	0.29
Aleación 1020		
	Laminada en frío	0.29
	Recocida	0.29
Aleación 1040		
	Trefilada en frío	0.29
	Recocida	0.29

(*continúa*)

Aleación 1090		
	Recocida	0.29
	Laminada en caliente	0.29
Aleación 4027		
	Recocida	0.29
	Normalizada	0.29
Aleación 4140		
	Recocida	0.29
	Normalizada	0.29
Aleación 4340		
	Recocida	0.29
	Normalizada	0.29
Aleación 5140		
	Recocida	0.29
	Normalizada	0.29
Aceros inoxidables		
Aleación 302		
	Recocida	0.25
	Laminada en frío	0.25
Aleación 316		
	Recocida	0.27
	Templada blanda	0.27
Aleación 405		
	Laminada en frío	0.27
	Recocida	0.27
Aleación 434		
	Recocida	0.27
Aleación 660		
	Laminada en frío	0.27
Aleación 17-7PH		
	Laminada en frío	0.27
Hierros fundidos		
Fundición gris (tal cual)		
	ASTM clase 20	0.29
	ASTM clase 35	0.29
Hierros fundidos dúctiles		
	Grado 60-40-18	0.29
	Grado 120-90-02	0.28
Aleaciones de aluminio		
Aleación 2024		
	Recocida	0.33
	Templada T3	0.33
	Templada T6	0.33
Aleación 6061		
	Recocida	0.33
	Templada T4	0.33
	Templada T6	0.33
Aleación 7075		
	Recocida	0.33
	Templada T6	0.33

(*continúa*)

Aleaciones de cobre		
Cobre electrolítico bien refinado, (C11000)		
	Trabajado en frío	0.33
Berilio cobre, (C17000)		
	TH04 Templado	0.3
	TH01 Templado	0.3
Latón para cartucho, (C26000)		
	H00 Templado	0.375
	H04 Templado	0.375
Metal de Muntz, (C28000)		
	H00 Templado	0.346
	H02 Templado	0.346
Latón de maquinado rápido, (C36000)		
	H01 Templado	0.311
	H02 Templado	0.311
Cromo cobre, (C18500)		
	TH04 Templado	0.3
	TH04 Templado	0.3
Bronce 90-10 (C22000)		
	H01 Templado	0.307
	H04 Templado	0.307
Aleaciones de magnesio		
Aleación AZ31B		
	Recocida	0.35
	Laminada dura	0.35
Aleación AZ63		
	F Templada	0.35
	T6 Templada	0.35
Aleación AZ91E		
	F Templada	0.35
	T4 Templada	0.35
Aleaciones de níquel		
Níquel-comercialmente puro		
	Tal como salió de la fundición	0.31
	Recocido	0.31
Níquel plata 65-18 (752)		
	Recocido	0.33
	Endurecido	0.33
Cuproníquel 30(715)		
	Recocido	0.33
	Endurecido	0.33
Aleaciones de titanio		
Titanio-comercialmente puro		
	Tal como salió de la fundición	0.34
Aleación Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo		
	Al laminarse	0.31
	Recocida	0.31

(*continúa*)

Aleaciones misceláneas		
	Aleación kovar	0.317
Invar		
	Aleación 32-5 (trefilada en frío)	0.23
	Aleación 36 (trefilada en frío)	0.23
Haynes 25		
	Laminada y recocida en frío	0.24
	Laminada y recocida en caliente	0.24
	Aleación de Co-Cr-Ni	0.226
	INCONEL (laminada en frío)	0.382
	INCOLOY 903	0.239
	INCONEL 725 (recocida)	0.31
	Berilio S-200	0.14
	Tungsteno	0.28
	Tantalio	0.35
	Zinc	0.25
Metales nobles		
	Oro	0.42
	Iridio	0.26
	Plata	0.39
	Platino, recocido	0.39
Polímeros		
	Nailon 66 (no reforzado)	0.39
Policarbonato (PC)		
	Moldeado	0.36
Polieteretercetona (PEEC)		
	Relleno de fibra de vidrio	0.45
	Relleno de fibra de carbón	0.44
Polietilentereftalato (PET)		
	Reforzado con 30% de vidrio	0.4
Polietileno (moldeado)		
	Densidad baja	0.38
	Poliestireno	0.33
	Politetrafluoroetileno (PTFE)	0.46
Policloruro de vinilo (PVC)		
	No reforzado	0.38
	Reforzado con 30% fibra de vidrio	0.41
	Poliacetal	0.35
Cerámicas, grafito y materiales semiconductores		
Óxido de aluminio		
	Alumina a 99.9%	0.22
Diamante		
	Natural	0.18
	Sintético	0.2
Vidrio		
	Vidrio de sílice	0.19

(*continúa*)

Carburo de silicio		
	Sinterizado	0.14
	Nitruro de silicio	0.25
	Carburo de titanio	0.18
	Carburo de zirconio	0.19
	Alumina a 96%	0.22
Fibras		
	Fibra de vidrio E genérica	0.2
	Fibra de vidrio C genérica	0.276
Materiales compuestos		
	Epoxi/vidrio CMC	0.36
	Epoxi/compuesto de fibra de carbón	0.34
Madera		
	Madera de maple rojo americano	0.04
	Madera de secoya americana	0.36
	Madera de roble rojo americano	0.33
	Madera de roble blanco	0.036

7. ELONGACIÓN PORCENTUAL A LA RUPTURA A TEMPERATURA AMBIENTE

Materiales		% de elongación a la ruptura
Aceros al carbón y de baja aleación		
Aleación 1006		
	Trefilada en frío	20
	Laminada en caliente	30
Aleación 1020		
	Laminada en frío	15
	Recocida	36.5
Aleación 1040		
	Trefilada en frío	12
	Recocida	30
Aleación 1090		
	Recocida	10
	Laminada en caliente	10
Aleación 4027		
	Recocida	30
	Normalizada	25.8
Aleación 4140		
	Recocida	25.7
	Normalizada	17.7
Aleación 4340		
	Recocida	22
	Normalizada	12.2
Aleación 5140		
	Recocida	28.6
	Normalizada	22.7

(*continúa*)

Aceros inoxidables		
Aleación 302		
	Recocida	55
	Laminada en frío	57
Aleación 316		
	Recocida	50
	Tratada para reblandecerla	50
Aleación 405		
	Laminada en frío	30
	Recocida	30
Aleación 434		
	Recocida	25
Aleación 660		
	Laminada en frío	25
Aleación 17-7PH		
	Laminada en frío	1
Hierros fundidos		
Hierros fundidos dúctiles		
	Grado 60-40-18	15
	Grado 120-90-02	1.5
Aleaciones de aluminio		
Aleación 2024		
	Templada T3	18
	Templada T6	5
Aleación 6061		
	Recocida	25
	Templada T4	22
	Templada T6	12
Aleación 7075		
	Recocida	16
	Templada T6	11
Aleaciones de cobre		
Cobre electrolítico bien refinado, (C11000)		
	Trabajado en frío	12
Berilio cobre, (C17000)		
	TH04 Templado	2.5
	TH01 Templado	4.5
Latón en cartucho, (C26000)		
	H00 Templado	35
	H04 Templado	8
Metal de Muntz, (C28000)		
	H00 Templado	30
	H02 Templado	10
Latón sin corte, (C36000)		
	H01 Templado	20
	H02 Templado	25

(*continúa*)

Cromo cobre, (C18500)		
	TH04 templado	16
	TH04 templado	26
Bronce 90-10, (C22000)		
	H01 templado	25
	H04 templado	5
Aleaciones de magnesio		
Aleación AZ31B		
	Recocida	21
	Laminada dura	15
Aleación AZ63		
	F templada	
	T6 templada	5
Aleación AZ91E		
	F templada	2.5
	T4 templada	15
Aleaciones de níquel		
Níquel-comercialmente puro		
	Tal como salió de la fundición	30
Níquel plata 65-18 (752)		
	Recocido	35
	Endurecido	3
Cuproníquel 30 (715)		
	Recocido	45
	Endurecido	15
Aleaciones de titanio		
Titanio-comercialmente puro		
	Tal como salió de la fundición	54
Aleación Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo		
	Al laminarse	10
	Recocida	11
Aleaciones misceláneas		
Invar		
	Aleación 32-5 (trefilada en frío)	40
	Aleación 36 (trefilada en frío)	20
Haynes 25		
	Laminada y recocida en frío	51
	Laminada y recocida en caliente	60
Biodur		
	Trabajada en caliente	22
	Recocida	25
	Aleación de Co-Cr-Ni	38
	INCONEL (laminada en frío)	47
	INCOLOY 903	14
	INCONEL 725 (recocida)	57
	Berilio S-200	10

(*continúa*)

	Metales nobles	
	Oro	30
	Iridio	20
	Plata	46
	Platino, recocido	35
	Polímeros	
Elastómeros		
	Hule butadieno-estireno (BE)	500
	Hule natural (no vulcanizado)	500
	Hule de nitrilo	320
Resinas epóxicas		
	Resina epóxica (no reforzada)	5
	Nailon 66 (no reforzado)	152
	Resina fenólica (no reforzada)	1.3
	Tereftalato de polibutileno (PBT)	148
Policarbonato (PC)		
	Moldeado	62
	Conductivo	6
	Poliéster (rígido)	2.4
Polieteretercetona (PEEC)		
	Relleno de fibra de vidrio	3
	Relleno de fibra de carbón	2
Polietilentereftalato (PET)		
	No reforzado	200
	Reforzado con 30% de vidrio	3.8
Polietileno (moldeado)		
	Densidad baja	350
	Densidad media	550
	Densidad alta	750
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)		
	Moldeado	55
	Relleno con 40% fibra de vidrio	1.5
	Relleno con 40% fibra de carbón	1.25
Polimetilmetacrilato (PMMA)		
	No reforzado	15
	Reforzado con fibra de vidrio	7.8
Polipropileno (PP)		
	No reforzado	427
	Relleno con 10% fibra de vidrio	250
	Relleno con 10% fibra de carbón	9
	Poliestireno	22.5
	Politetrafluoroetileno (PTFE)	325
Policloruro de vinilo (PVC)		
	No reforzado	62
	Reforzado con 30% fibra de vidrio	2.5
	Acrilonitrilo-estireno	3.8
	Acetato de celulosa	35
	Acrilonitrilo	3.5
	Poliacetal	105
	Sulfuro de polifenileno moldeado	3
	Polisulfona	42.5

(*continúa*)

Fibras	
Fibra de vidrio E genérica	4.8
Fibra de vidrio C genérica	4.8
Precursor de fibra de carbón	1.8
Materiales compuestos	
Epoxi/vidrio SMC	0.49
Policarbonato reforzado con fibra de aramida	6.2
Nailon 6/6 reforzado con fibra de aramida	1.6
Policarbonato reforzado con fibra de carbón	4.5
Policarbonato reforzado con carbón + fibra de vidrio	2.75

8. REDUCCIÓN PORCENTUAL EN ÁREA A TEMPERATURA AMBIENTE

Materiales		% Reducción en área
Aceros al carbón y de baja aleación		
Aleación 1006		
	Trefilada en frío	45
	Laminada en caliente	55
Aleación 1020		
	Laminada en frío	40
	Recocida	66
Aleación 1040		
	Trefilada en frío	35
	Recocida	57
Aleación 1090		
	Recocida	40
	Laminada en caliente	25
Aleación 4027		
	Recocida	52.9
	Normalizada	60.2
Aleación 4140		
	Recocida	56.9
	Normalizada	46.8
Aleación 4340		
	Recocida	50
	Normalizada	36.3
Aleación 5140		
	Recocida	59.2
	Normalizada	57.3
Aceros inoxidables		
Aleación 660		
	Laminada en frío	36.8

(*continúa*)

Aleaciones de cobre		
Latón de maquinado rápido (C36000)		50
Aleaciones de titanio		
Aleación Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo		
	Al laminarse	28
	Recocida	30
Aleaciones misceláneas		
	Aleación 36 (trefilada en frío)	60
Biodur		
	Trabajada en caliente	68
	Recocida	23

9. RESISTENCIA DE IMPACTO IZOD A TEMPERATURA AMBIENTE

		Impacto Izod	
Materiales		**J**	**Ft-lb**
Aceros al medio carbón y de baja aleación			
	Recocida	125	92.225
Aleación 1040			
	Extraída en frío	49	36.1522
	Recocida	45	33.201
Aleación 1090			
	Laminada en caliente	4	2.9512
Aleación 4140			
	Recocida	62	45.7436
	Normalizada	87	64.1886
Aleación 4340			
	Recocida	51	37.6278
	Normalizada	16	11.8048
Aleación 5140			
	Recocida	41	30.2498
Aceros inoxidables			
Aleación 302			
	Recocida	136	100.3408
Aleación 316			
	Recocida	129	95.1762
Aleación 405			
	Laminada en frío	41	30.2498
	Recocida	41	30.2498

(*continúa*)

Polímeros			
Resinas epóxicas			
	Resina epóxica (no reforzada)	0.3	0.22134
	Nailon 66 (no reforzado)	7	5.1646
	Resina fenólica (no reforzada)	0.18	0.132804
	Tereftalato de polibutileno (PBT)	0.27	0.199206
Policarbonato (PC)			
	Moldeado	4.78	3.526684
	Conductivo	0.52	0.383656
	Poliéster (rígido)	0.22	0.162316
Polieteretercetona (PEEC)			
	Relleno de fibra de vidrio	1.1	0.81158
	Relleno de fibra de carbón	0.12	0.088536
Polietilentereftalato (PET)			
	No reforzado	1.4	1.03292
	Reforzado con 30% de vidrio	1.1	0.81158
Polietileno (moldeado)			
	Densidad baja	1.068	0.7879704
	Densidad media	4.8	3.54144
	Densidad alta	4.01	2.958578
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)			
	Moldeado	3.2	2.36096
	Relleno con 40% de fibra de vidrio	0.63	0.464814
	Relleno con 40% de fibra de carbón	0.5	0.3689
Polimetilmetacrilato (PMMA)			
	No reforzado	0.16	0.118048
	Reforzado con fibra de vidrio	0.45	0.33201
Polipropileno (PP)			
	No reforzado	0.16	0.118048
	Relleno con 10% de fibra de vidrio	1.12	0.826336
	Relleno con 10% de fibra de carbón	0.8	0.59024
	Poliestireno	0.18	0.132804
	Politetrafluoroetileno (PTFE)	1.6	1.18048
Policloruro de vinilo (PVC)			
	No reforzado	5.3	3.91034
	Reforzado con 30% de fibra de vidrio	0.8	0.59024
	Acrilonitrilo-estireno	0.17	0.125426
	Acetato de celulosa	2.42	1.785476
	Acrilonitrilo	2.7	1.99206
	Poliacetal	5.2	3.83656
	Sulfuro de polifenileno moldeado	1.25	0.92225
	Polisulfona	0.8	0.59024
Materiales compuestos			
	Epoxi/vidrio CMC	14.1	10.40298
	Policarbonato reforzado con fibra de aramida	0.6	0.44268
	Nailon 6/6 reforzado con fibra de aramida	1.44	1.062432
	Policarbonato reforzado con fibra de carbón	1.26	0.929628
	Policarbonato reforzado con carbón + fibra de vidrio	1.22	0.900116
	Policarbonato claro reforzado con 30% de fibra de vidrio	1.6	1.18048

(*continúa*)

10. RESISTENCIA A LA FRACTURA A TEMPERATURA AMBIENTE

Materiales		Resistencia a la fractura	
		Mpa $(m)^{0.5}$	Ksi $(in)^{0.5}$
Aceros al carbón y de baja aleación			
Aleación 1040			
	Trefilada en frío	54	48.6
Aleación 4140			
	Normalizada	60	54
Aleación 4340			
	Normalizada	55	49.5
Aleaciones de aluminio			
Aleación 2024			
	Con tratamiento T3	44	39.6
Aleación 6061			
	Con tratamiento T6	29	26.1
Aleación 7075			
	Con tratamiento T6	25	22.5
Polímeros			
Resinas epóxicas			
	Resina epóxica (no reforzada)	0.6	0.54
	Nailon 66 (no reforzado)	2.8	2.52
Policarbonato (PC)			
	Moldeado	3.1	2.79
	Poliéster (rígido)	0.6	0.54
Polietilentereftalato (PET)			
	No reforzado	5	4.5
Polimetilmetacrilato (PMMA)			
	No reforzado	1.2	1.08
Polipropileno (PP)			
	No reforzado	3.7	3.33
Policloruro de vinilo (PVC)			
	No reforzado	2.3	2.07
Cerámicas, grafito y materiales semiconductores			
Óxido de aluminio			
	Alumina a 99.9%	4.5	4.05
	Alumina a 95%	3.6	3.24
	Concreto	0.9	0.81
Diamante			
	Natural	6.5	5.85
	Sintético	8	7.2
Vidrio			
	Vidrio de borosilicato	0.8	0.72
	Vidrio de sílice	0.7	0.63
	Sílice fundida	0.8	0.72
Carburo de silicio			
	Sinterizado	3.4	3.06
	Sublimado	4	3.6
	Nitruro de silicio	4.5	4.05
	Zirconia	10	9
	Carburo de tungsteno	6	5.4

11. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA A TEMPERATURA AMBIENTE

Materiales		Resistividad eléctrica Ohm-cm
Aceros al carbón y de baja aleación		
Aleación 1006		
	Trefilada en frío	1.74E−05
	Laminada en caliente	1.74E−05
Aleación 1020		
	Laminada en frío	1.59E−05
	Recocida	1.59E−05
Aleación 1040		
	Trefilada en frío	1.71E−05
	Recocida	1.71E−05
Aleación 1090		
	Recocida	1.74E−05
	Laminada en caliente	1.74E−05
Aleación 4027		
	Recocida	2.45E−05
	Normalizada	2.45E−05
Aleación 4140		
	Recocida	2.20E−05
	Normalizada	2.20E−05
Aleación 4340		
	Recocida	2.48E−05
	Normalizada	2.48E−05
Aleación 5140		
	Recocida	2.28E−05
	Normalizada	2.28E−05
Aceros inoxidables		
Aleación 302		
	Recocida	7.20E−05
	Laminada en frío	7.20E−05
Aleación 316		
	Recocida	7.40E−05
	Tratada para reblandecerla	7.40E−05
Aleación 405		
	Laminada en frío	6.00E−05
	Recocida	6.00E−05
Aleación 434		
	Recocida	6.00E−05
Aleación 17-7PH		
	Laminada en frío	8.30E−05
Hierros fundidos		
Fundición gris (tal cual)		
	ASTM clase 20	8.00E−05
	ASTM clase 35	8.00E−05

(*continúa*)

Hierros fundidos dúctiles		
	Grado 60-40-18	6.00E−05
	Grado 120-90-02	6.00E−05
	Aleaciones de aluminio	
Aleación 2024		
	Recocida	3.49E−06
	Con tratamiento T3	5.82E−06
	Con tratamiento T6	4.49E−06
Aleación 6061		
	Recocida	3.66E−06
	Con tratamiento T4	4.32E−06
	Con tratamiento T6	3.99E−06
Aleación 7075		
	Recocida	3.80E−06
	Con tratamiento T6	5.50E−06
	Aleaciones de cobre	
Cobre electrolítico bien refinado, (C11000)		
	Trabajado en frío	1.70E−06
Berilio cobre, (C17000)		
	Con tratamiento TH04	6.90E−06
	Con tratamiento TH01	6.90E−06
Latón para cartucho, (C26000)		
	Con tratamiento H00	6.20E−06
	Con tratamiento H04	6.20E−06
Metal de Muntz, (C28000)		
	Con tratamiento H00	6.16E−06
	Con tratamiento H02	6.16E−06
Latón de maquinado rápido, (C36000)		
	Con tratamiento H01	6.60E−06
	Con tratamiento H02	6.60E−06
Cromo cobre, (C18500)		
	Con tratamiento TH04	2.16E−06
	Con tratamiento TH04	2.16E−06
Bronce 90-10, (C22000)		
	Con tratamiento H01	2.72E−06
	Con tratamiento H04	2.72E−06
	Aleaciones de magnesio	
Aleación AZ31B		
	Recocida	9.20E−06
	Laminada dura	9.20E−06
Aleación AZ63		
	Con tratamiento F	1.15E−05
	Con tratamiento T6	1.18E−05
Aleación AZ91E		
	Con tratamiento F	1.43E−05
	Con tratamiento T4	1.70E−05

(*continúa*)

Aleaciones de níquel		
Níquel-comercialmente puro		
	Tal como salió de la fundición	6.40E−06
	Recocido	6.40E−06
Níquel plata 65-18 (752)		
	Recocido	2.90E−05
	Endurecido	2.90E−05
Cuproníquel 30(715)		
	Recocido	3.75E−05
	Endurecido	3.75E−05
Aleaciones de titanio		
Titanio-comercialmente puro		
	Tal como salió de la fundición	5.54E−05
Aleación Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo		
	Al laminarse	0.00016
	Recocido	0.00016
Aleaciones misceláneas		
	Aleación kovar	4.90E−05
Invar		
	Aleación 32-5 (trefilada en frío)	8.00E−05
	Aleación 36 (trefilada en frío)	8.20E−05
Haynes 25		
	Laminada y recocida en frío	8.86E−05
	Laminada y recocida en caliente	8.86E−05
Biodur		
	Trabajada en caliente	7.40E−05
	Recocida	7.40E−05
	Aleación de Co-Cr-Ni	9.96E−05
	INCONEL (Laminada en frío)	9.85E−05
	INCOLOY 903	6.10E−05
	INCONEL 725 (recocida)	1.30E−04
	Berilio S-200	4.30E−06
	Tungsteno	5.65E−06
	Tantalio	1.24E−05
	Zinc	5.92E−06
Metales nobles		
	Oro	2.20E−06
	Iridio	4.70E−06
	Plata	1.55E−06
	Platino, recocido	1.06E−05
Polímeros		
Elastómeros		
	Hule butadieno-estireno (BE)	1.00E+15
	Hule natural (no vulcanizado)	1.00E+15
	Hule de nitrilo	1.00E+16

(*continúa*)

Resinas epóxicas		
	Resina epóxica (no reforzada)	1.00E+15
	Nailon 66 (no reforzado)	1.00E+12
	Resina fenólica (no reforzada)	3.42E+11
	Tereftalato de polibutileno (PBT)	1.00E+14
Policarbonato (PC)		
	Moldeado	1.00E+15
	Conductivo	1.00E+14
	Poliéster (rígido)	1.00E+14
Polieteretercetona (PEEC)		
	Relleno con fibra de vidrio	1.00E+15
	Relleno con fibra de carbón	1.00E+09
Polietilentereftalato (PET)		
	No reforzado	2.00E+15
	Reforzado con 30% de vidrio	1.00E+15
Polietileno (moldeado)		
	Densidad baja	1.00E+15
	Densidad media	1.00E+15
	Densidad alta	1.00E+06
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)		
	Moldeado	1.00E+14
	Relleno con 40% de fibra de vidrio	1.00E+15
	Relleno con 40% de fibra de carbón	5.00E+04
Polimetilmetacrilato (PMMA)		
	No reforzado	1.00E+14
	Reforzado con fibra de vidrio	1.00E+16
Polipropileno (PP)		
	No reforzado	1.00E+14
	Relleno con 10% de fibra de vidrio	1.00E+15
	Relleno con 10% de fibra de carbón	5.00E+04
	Poliestireno	1.00E+15
	Politetrafluoroetileno (PTFE)	1.00E+11
Policloruro de vinilo (PVC)		
	No reforzado	6.00E+14
	Acrilonitrilo-estireno	1.00E+15
	Acetato de celulosa	1.00E+12
	Poliacetal	1.00E+14
	Sulfuro de polifenileno moldeado	1.00E+15
	Polisulfona	1.00E+15
Cerámicas, grafito y materiales semiconductores		
Óxido de aluminio		
	Alumina a 99.9%	1.00E+14
	Alumina a 95%	1.00E+16
Diamante		
	Natural	1.00E+15
	Arseniuro de galio	1.00E+07
Vidrio		
	Vidrio de borosilicato	1.00E+16
	Vidrio de sílice	5.00E+09
	Carbón de grafito	6.00E−03
	Sílice fundida	2.00E+14

(*continúa*)

Carburo de silicio		
	Sinterizado	1.00E+00
	Nitruro de silicio	1.00E+11
	Zirconia	1.00E+09
	Carburo de titanio	0.00018
	Carburo de tungsteno	5.30E−04
	Carburo de zirconio	5.00E−05
	Alumina a 96%	1.00E+14
	Nitruro de boro	1.00E+13
Fibras		
	Fibra de vidrio E genérica	4.02E+12
	Fibra de vidrio C genérica	4.00E+10
	Precursor de fibra de carbón	1.45E−03
Materiales compuestos		
	Epoxi/vidrio CMC	3.00E+14
	Policarbonato reforzado con fibra de aramida	1.00E+16
	Policarbonato reforzado con fibra de carbón	1.00E+10
	Policarbonato reforzado con carbón + fibra de vidrio	1.00E+06
	Policarbonato claro reforzado con 30% de fibra de vidrio	1.00E+16

12. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA A TEMPERATURA AMBIENTE

		Conductividad térmica	
Materiales		**W/m-K**	**Btu/ft-h-F**
Aceros al carbón y de baja aleación			
Aleación 1006			
	Extraída en frío	51.9	30.00
	Laminada en caliente	51.9	30.00
Aleación 1020			
	Laminada en frío	51.9	30.00
	Recocida	51.9	30.00
Aleación 1040			
	Trefilada en frío	51.9	30.00
	Recocida	51.9	30.00
Aleación 1090			
	Recocida	49.8	28.79
	Laminada en caliente	51.9	30.00
Aleación 4027			
	Normalizada	44.5	25.72
Aleación 4140			
	Recocida	42.6	24.62
	Normalizada	42.6	24.62

(*continúa*)

Aleación 4340			
	Recocida	44.5	25.72
	Normalizada	44.5	25.72
Aleación 5140			
	Recocida	44.6	25.78
	Normalizada	44.6	25.78
Aceros inoxidables			
Aleación 302			
	Recocida	16.2	9.36
	Laminada en frío	16.2	9.36
Aleación 316			
	Recocida	16.3	9.42
	Templada blanda	16.3	9.42
Aleación 405			
	Laminada en frío	27	15.61
	Recocida	27	15.61
Aleación 434			
	Recocida	26.1	15.09
Aleación 660			
	Laminada en frío	12.6	7.28
Aleación 17-7PH			
	Laminada en frío	16.4	9.48
Hierros fundidos			
Fundición gris (tal cual)			
	ASTM clase 20	50	28.90
	ASTM clase 35	50	28.90
Hierros fundidos dúctiles			
	Grado 60-40-18	36	20.81
	Grado 120-90-02	36	20.81
Aleaciones de aluminio			
Aleación 2024			
	Recocida	193	111.56
	Con tratamiento T3	121	69.94
	Con tratamiento T6	151	87.28
Aleación 6061			
	Recocida	180	104.05
	Con tratamiento T4	154	89.02
	Con tratamiento T6	167	96.53
Aleación 7075			
	Recocida	173	100.00
	Con tratamiento T6	130	75.14
Aleaciones de cobre			
Cobre electrolítico bien refinado, (C11000)			
	Trabajado en frío	388	224.28
Berilio cobre, (C17000)			
	TH04 Templado	118	68.21
	TH01 Templado	118	68.21

(*continúa*)

Latón para cartucho, (C26000)			
	H00 Templado	120	69.36
	H04 Templado	120	69.36
Metal de Muntz, (C28000)			
	H00 Templado	123	71.10
	H02 Templado	123	71.10
Latón de maquinado rápido, (C36000)			
	H01 Templado	115	66.47
	H02 Templado	115	66.47
Bronce 90-10, (C22000)			
	H01 Templado	189	109.25
	H04 Templado	189	109.25
Aleaciones de magnesio			
Aleación AZ31B			
	Recocida	96	55.49
	Laminada dura	96	55.49
Aleación AZ63			
	Con tratamiento F	59.2	34.22
	Con tratamiento T6	61	35.26
Aleación AZ91E			
	Con tratamiento F	72.7	42.02
	Con tratamiento T4	72.7	42.02
Aleaciones de níquel			
Níquel-comercialmente puro			
	Tal como salió de la fundición	60.7	35.09
	Recocido	60.7	35.09
Aleaciones de titanio			
Titanio-comercialmente puro			
	Tal como salió de la fundición	17	9.83
Aleación Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo			
	Al laminarse	6.4	3.70
	Recocido	6.4	3.70
Aleaciones misceláneas			
	Aleación kovar	17.3	10.00
Invar			
	Aleación 36 (extraída en frío)	10.15	5.87
Haynes 25			
	Laminada y recocida en frío	9.4	5.43
	Laminada y recocida en caliente	9.4	5.43
Biodur			
	Trabajada en caliente	12.766	7.38
	Recocido	12.66	7.32
	Aleación de Co-Cr-Ni	12.5	7.23
	INCONEL (laminada en frío)	12.5	7.23
	INCOLOY 903	16.7	9.65
	Berilio S-200	216	124.86
	Tungsteno	163.3	94.39
	Tantalio	59.4	34.34
	Zinc	112.2	64.86

(*continúa*)

Metales nobles			
	Oro	301	173.99
	Iridio	147	84.97
	Plata	419	242.20
	Platino, recocido	69.1	39.94
Polímeros			
Elastómeros			
	Hule natural (no vulcanizado)	0.14	0.08
Resinas epóxicas			
	Resina epóxica (no reforzada)	0.2	0.12
	Nailon 66 (no reforzado)	0.26	0.15
	Resina fenólica (no reforzada)	0.56	0.32
	Tereftalato de polibutileno (PBT)	0.2	0.12
Policarbonato (PC)			
	Moldeado	0.2	0.12
	Poliéster (rígido)	0.17	0.10
Polieteretercetona (PEEC)			
	Relleno de fibra de vidrio	0.33	0.19
	Relleno de fibra de carbón	0.6	0.35
Polietilentereftalato (PET)			
	No reforzado	0.2	0.11
	Reforzado con 30% de vidrio	0.29	0.17
Polietileno (moldeado)			0.00
	Densidad baja	0.3	0.17
	Densidad media	0.35	0.20
	Densidad alta	0.35	0.20
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)			
	Moldeado	0.158	0.09
	Relleno con 40% de fibra de vidrio	0.23	0.13
	Relleno con 40% de fibra de carbón	0.55	0.32
Polimetilmetacrilato (PMMA)			
	No reforzado	0.22	0.13
Polipropileno (PP)			
	No reforzado	0.12	0.07
	Relleno con 10% de fibra de vidrio	0.24	0.14
	Poliestireno	0.16	0.09
	Politetrafluoroetileno (PTFE)	0.3	0.17
	Acrilonitrilo-estireno	0.163	0.09
	Acetato de celulosa	0.25	0.14
	Acrilonitrilo	0.225	0.13
	Poliacetal	0.31	0.18
	Sulfuro de polifenileno moldeado	0.31	0.18
	Polisulfona	0.18	0.10
Cerámicas, grafito y materiales semiconductores			
Óxido de aluminio			
	Alumina a 99.9%	30	17.34
	Alumina a 95%	20	11.56
	Concreto	0.51	0.29

(*continúa*)

Diamante			
	Natural	2000	1156.07
	Sintético	2000	1156.07
	Arseniuro de galio	50	28.90
Vidrio			
	Vidrio de borosilicato	1.1	0.64
	Vidrio de sílice	1.38	0.80
	Carbón de grafito	24	13.87
	Sílice fundida	0.8	0.46
Carburo de silicio			
	Sinterizado	125.6	72.60
	Sublimado	110	63.58
	Zirconia	1.675	0.97
	Alumina a 96%	25	14.45
Fibras			
	Fibra de vidrio E genérica	1.3	0.75
	Fibra de vidrio C genérica	1.1	0.64
	Precursor de fibra de carbón	15	8.67
Materiales compuestos			
	Epoxi/vidrio CMC	0.47	0.27
	Epoxi/compuesto de fibra de carbón	200	115.61
	Policarbonato reforzado con fibra de aramida	0.22	0.13
	Policarbonato reforzado con fibra de carbono	0.62	0.36

13. COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA A TEMPERATURA AMBIENTE

		Coeficiente de Expansión térmica	
Materiales		**1E−6/K**	**1E−6/F**
Aceros al carbón y de baja aleación			
Aleación 1006			
	Trefilada en frío	12.6	7.01
	Laminada en caliente	12.6	7.01
Aleación 1020			
	Laminada en frío	11.7	6.51
	Recocida	11.7	6.51
Aleación 1040			
	Trefilada en frío	11.3	6.29
	Recocida	11.3	6.29
Aleación 1090			
	Laminada en caliente	11.5	6.40
Aleación 4140			
	Recocida	12.2	6.79
	Normalizada	12.2	6.79

(*continúa*)

Aleación 4340			
	Recocida	12.3	6.84
	Normalizada	12.3	6.84
Aleación 5140			
	Recocida	12.6	7.01
	Normalizada	12.6	7.01
Aceros inoxidables			
Aleación 302			
	Recocida	17.2	9.57
	Laminada en frío	17.2	9.57
Aleación 316			
	Recocida	16	8.90
	Templada blanda	16	8.90
Aleación 405			
	Laminada en frío	10.8	6.01
	Recocida	10.8	6.01
Aleación 434			
	Recocida	10.4	5.79
Aleación 660			
	Laminada en frío	16.9	9.40
Aleación 17-7PH			
	Laminada en frío	11	6.12
Hierros fundidos			
Fundición gris (tal cual)			
	ASTM clase 20	13.5	7.51
	ASTM clase 35	13.5	7.51
Hierros fundidos dúctiles			
	Grado 60-40-18	13	7.23
	Grado 120-90-02	13	7.23
Aleaciones de aluminio			
Aleación 2024			
	Recocida	23.2	12.91
	Con tratamiento T3	23.2	12.91
	Con tratamiento T6	23.2	12.91
Aleación 6061			
	Recocida	23.6	13.13
	Con tratamiento T4	23.6	13.13
	Con tratamiento T6	23.6	13.13
Aleación 7075			
	Recocida	23.6	13.13
	Con tratamiento T6	23.6	13.13
Aleaciones de cobre			
Cobre electrolítico bien refinado, (C11000)			
	Trabajado en frío	17	9.46
Berilio cobre, (C17000)			
	TH04 Templado	16.7	9.29
	TH01 Templado	16.7	9.29

(*continúa*)

Latón para cartucho, (C26000)			
	H00 Templado	19.9	11.07
	H04 Templado	19.9	11.07
Metal de Muntz, (C28000)			
	H00 Templado	20.8	11.57
	H02 Templado	20.8	11.57
Latón de maquinado rápido, (C36000)			
	H01 Templado	20.5	11.41
	H02 Templado	20.5	11.41
Cromo cobre, (C18500)			
	TH04 Templado	17.6	9.79
	TH04 Templado	17.6	9.79
Bronce 90-10, (C22000)			
	H01 Templado	18.4	10.24
	H04 Templado	18.4	10.24
Aleaciones de magnesio			
Aleación AZ31B			
	Recocida	26	14.47
	Laminada dura	26	14.47
Aleación AZ63			
	Con tratamiento F	26.1	14.52
	Con tratamiento T6	26.1	14.52
Aleación AZ91E			
	Con tratamiento F	26	14.47
	Con tratamiento T4	26	14.47
Aleaciones de níquel			
Níquel-comercialmente puro			
	Tal como salió de la fundición	13.1	7.29
	Recocido	13.1	7.29
Níquel plata 65-18 (752)			
	Recocido	17	9.46
	Endurecido	17	9.46
Cuproníquel 30(715)			
	Recocido	15.5	8.62
	Endurecido	15.5	8.62
Aleaciones de titanio			
Titanio-comercialmente puro			
	Tal como salió de la fundición	8.9	4.95
Aleación Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo			0.00
	Al laminarse	9.2	5.12
	Recocido	9.2	5.12
Aleaciones misceláneas			
	Aleación kovar	5.86	3.26
Invar			
	Aleación 32-5 (trefilada en frío)	0.194	0.11
	Aleación 36 (trefilada en frío)	1.3	0.72

(*continúa*)

Haynes 25			
	Laminada y recocida en frío	12.3	6.84
	Laminada y recocida en caliente	12.3	6.84
Biodur			
	Trabajada en caliente	12.791	7.12
	Recocida	13.18	7.33
	Aleación de Co-Cr-Ni	15.17	8.44
	INCONEL (laminada en frío)	13.46	7.49
	INCOLOY 903	7.65	4.26
	INCONEL 725 (recocida)	13	7.23
	Berilio S-200	11.5	6.40
	Tungsteno	4.4	2.45
	Tantalio	6.5	3.62
	Zinc	31.2	17.36
	Metales nobles		
	Oro	14.4	8.01
	Iridio	6.8	3.78
	Plata	19.6	10.91
	Platino, recocido	9.1	5.06
	Polímeros		
Elastómeros			
	Hule natural (no vulcanizado)	666	370.56
	Hule de nitrilo	702	390.59
Resinas epóxicas			
	Resina epóxica (no reforzada)	100	55.64
	Nailon 66 (no reforzado)	105	58.42
	Resina fenólica (no reforzada)	77	42.84
	Tereftalato de polibutileno (PBT)	97	53.97
Policarbonato (PC)			
	Moldeado	77	42.84
	Conductivo	59	32.83
	Poliéster (rígido)	135	75.11
Polieteretercetona (PEEC)			
	Relleno de fibra de vidrio	25	13.91
	Relleno de fibra de carbón	21	11.68
Polietilentereftalato (PET)			
	No reforzado	83	46.18
	Reforzado con 30% de vidrio	25	13.91
Polietileno (moldeado)			
	Densidad baja	130	72.33
	Densidad media	27	15.02
	Densidad alta	112	62.32
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)			
	Moldeado	107	59.53
	Relleno con 40% de fibra de vidrio	23	12.80
	Relleno con 40% de fibra de carbón	22	12.24
Polimetilmetacrilato (PMMA)			
	No reforzado	95	52.86

(*continúa*)

Polipropileno (PP)			
	No reforzado	105	58.42
	Relleno con 10% de fibra de vidrio	51	28.38
	Poliestireno	87	48.41
	Politetrafluoroetileno (PTFE)	119	66.21
Policloruro de vinilo (PVC)			
	No reforzado	50	27.82
	Reforzado con 30% de fibra de vidrio	21	11.68
	Acrilonitrilo-estireno	65	36.17
	Acetato de celulosa	159	88.47
	Acrilonitrilo	66	36.72
	Poliacetal	135	75.11
	Sulfuro de polifenileno moldeado	32	17.80
	Polisulfona	77	42.84
Cerámicas, grafito y materiales semiconductores			
Óxido de aluminio			
	Alumina a 99.9%	7.4	4.12
	Alumina a 95%	6.2	3.45
Diamante			
	Natural	1.18	0.66
	Arseniuro de galio	5.4	3.00
Vidrio			
	Vidrio de borosilicato	4	2.23
	Vidrio de sílice	0.75	0.42
	Carbón de grafito	2.4	1.34
	Sílice fundida	0.6	0.33
Carburo de silicio			
	sublimado	4.62	2.57
	Nitruro de silicio	2.8	1.56
	Zirconia	12	6.68
	Carburo de titanio	7.7	4.28
	Carburo de tungsteno	5.2	2.89
	Alumina a 96%	6.4	3.56
Fibras			
	Fibra de vidrio E genérica	5	2.78
	Fibra de vidrio C genérica	6.3	3.51
	Precursor de fibra de carbón	−0.75	−0.42
Materiales compuestos			
	Epoxi/vidrio CMC	3.6	2.00
	Epoxi/compuesto de fibra de carbón	12	6.68
	Policarbonato reforzado con fibra de aramida	38	21.14
	Policarbonato reforzado con fibra de carbón	22	12.24
	Policarbonat reforzado con carbón + fibra de vidrio	36	20.03
Madera			
	Madera de maple rojo americano	11.1	6.18
	Madera de roble blanco	11.1	6.18

(*continúa*)

14. CAPACIDAD TÉRMICA ESPECÍFICA A TEMPERATURA AMBIENTE

Materiales		Capacidad térmica específica J/g-K	Capacidad térmica específica Btu/lb-F
Aceros al medio carbón y de baja aleación			
Aleación 1006			
	Trefilada en frío	0.481	0.11544
	Laminada en caliente	0.481	0.11544
Aleación 1020			
	Laminada en frío	0.486	0.11664
	Recocida	0.486	0.11664
Aleación 1040			
	Trefilada en frío	0.486	0.11664
	Recocida	0.486	0.11664
Aleación 1090			
	Recocida	0.472	0.11328
	Laminada en caliente	0.472	0.11328
Aleación 4027			
	Normalizada	0.475	0.114
Aleación 4140			
	Recocida	0.473	0.11352
	Normalizada	0.473	0.11352
Aleación 4340			
	Recocida	0.475	0.114
	Normalizada	0.475	0.114
Aleación 5140			
	Recocida	0.452	0.10848
	Normalizada	0.452	0.10848
Aceros inoxidables			
Aleación 302			
	Recocida	0.5	0.12
	Laminada en frío	0.5	0.12
Aleación 316			
	Recocida	0.5	0.12
	Templada blanda	0.5	0.12
Aleación 405			
	Laminada en frío	0.46	0.1104
	Recocida	0.46	0.1104
Aleación 434			
	Recocida	0.46	0.1104
Aleación 660			
	Laminada en frío	0.46	0.1104
Aleación 17-7PH			
	Laminada en frío	0.46	0.1104
Aleaciones de aluminio			
Aleación 2024			
	Recocida	0.875	0.21
	Con tratamiento T3	0.875	0.21
	Con tratamiento T6	0.875	0.21

(*continúa*)

Aleación 6061			
	Recocida	0.896	0.21504
	Con tratamiento T4	0.896	0.21504
	Con tratamiento T6	0.896	0.21504
Aleación 7075			
	Recocida	0.96	0.2304
	Con tratamiento T6	0.96	0.2304
Aleaciones de cobre			
Cobre electrolítico bien refinado, (C11000)			
	Trabajado en frío	0.385	0.0924
Berilio cobre, (C17000)			
	Con tratamiento TH04	0.42	0.1008
	Con tratamiento TH01	0.42	0.1008
Latón para cartucho, (C26000)			
	Con tratamiento H00	0.375	0.09
	Con tratamiento H04	0.375	0.09
Metal de Muntz, (C28000)			
	Con tratamiento H00	0.375	0.09
	Con tratamiento H02	0.375	0.09
Latón de maquinado rápido, (C36000)			
	Con tratamiento H01	0.38	0.0912
	Con tratamiento H02	0.38	0.0912
Cromo cobre, (C18500)			
	Con tratamiento TH04	0.385	0.0924
	Con tratamiento TH04	0.385	0.0924
Bronce 90-10, (C22000)			
	Con tratamiento H01	0.376	0.09024
	Con tratamiento H04	0.376	0.09024
Aleaciones de magnesio			
Aleación AZ31B			
	Recocida	1	0.24
	Laminada dura	1	0.24
Aleación AZ63			
	Con tratamiento F	1.05	0.252
	Con tratamiento T6	1.05	0.252
Aleación AZ91E			
	Con tratamiento F	0.8	0.192
	Con tratamiento T4	1.047	0.25128
Aleaciones de níquel			
Níquel-comercialmente puro			
	Tal como salió de la fundición	0.46	0.1104
	Recocido	0.46	0.1104
Aleaciones de titanio			
Titanio-comercialmente puro			
	Tal como salió de la fundición	0.528	0.12672
Aleación Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo			
	Al laminarse	0.552	0.13248
	Recocido	0.552	0.13248

(*continúa*)

Aleaciones misceláneas			
Invar	Aleación kovar	0.439	0.10536
Biodur	Aleación 36 (trefilada en frío)	0.515	0.1236
	Trabajada en caliente	0.452	0.10848
	Recocida	0.47	0.1128
	Aleación de Co-Cr-Ni	0.43	0.1032
	INCONEL (laminada en frío)	0.444	0.10656
	INCOLOY 903	0.435	0.1044
	Berilio S-200	1.925	0.462
	Tungsteno	0.134	0.03216
	Tantalio	0.138	0.03312
	Zinc	0.3898	0.093552
Metales nobles			
	Oro	0.1323	0.031752
	Iridio	0.135	0.0324
	Plata	0.234	0.05616
	Platino, recocido	0.134	0.03216
Polímeros			
Elastómeros			
	Hule natural (no vulcanizado)	0.45	0.108
Resinas epóxicas			
	Resina epóxica (no reforzada)	1	0.24
	Nailon 66 (no reforzado)	2.1	0.504
	Resina fenólica (no reforzada)	1.6	0.384
	Tereftalato de polibutileno (PBT)	2	0.48
Policarbonato (PC)			
	Moldeado	1.1	0.264
Polieteretercetona (PEEC)			
	Relleno de fibra de vidrio	1.9	0.456
	Relleno de fibra de carbón	1.9	0.456
Polietilentereftalato (PET)			
	Reforzado con 30% de vidrio	2.3	0.552
Polietileno (moldeado)			
	Densidad baja	2.2	0.528
	Densidad media	2.2	0.528
	Densidad alta	2.2	0.528
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)			
	Moldeado	2	0.48
Polimetilmetacrilato (PMMA)			
	No reforzado	1.46	0.3504
Polipropileno (PP)			
	No reforzado	2	0.48
	Poliestireno	1.7	0.408
	Politetrafluoroetileno (PTFE)	1.3	0.312
Policloruro de vinilo (PVC)			
	Acrilonitrilo-estireno	1.7	0.408
	Acetato de celulosa	1.4	0.336
	Polisulfona	1.2	0.288

(*continúa*)

Cerámicas, grafito y materiales semiconductores			
Óxido de aluminio			
	Alumina a 99.9%	0.85	0.204
	Alumina a 95%	0.439	0.10536
Diamante			
	Natural	0.4715	0.11316
	Arseniuro de galio	0.325	0.078
Vidrio			
	Vidrio de sílice	0.75	0.18
	Carbón de grafito	0.69	0.1656
Carburo de silicio			
	Sinterizado	0.67	0.1608
	Alumina a 96%	0.88	0.2112
Fibras			
	Fibra de vidrio E genérica	0.81	0.1944
	Fibra de vidrio C genérica	0.787	0.18888
Materiales compuestos			
	Epoxi/compuesto de fibra de carbón	1.1	0.264

COMPOSICIÓN DE ALEACIONES SELECCIONADAS

Materiales	Composición
Aceros al carbón y de baja aleación	
Aleación 1006	Fe-99.43 (mín), C-0.08 (máx), Mn-0.45 (máx), P-0.04 (máx), S-0.05 (máx)
Aleación 1020	Fe-99.08 (mín), C-0.17 (mín), Mn-0.3 (mín), P-0.04 (máx), S-0.05 (máx)
Aleación 1040	Fe-98.6 (mín), C-0.37 (mín), Mn-0.6 (mín), P-0.04 (máx), S-0.05 (máx)
Aleación 1090	Fe-0.85 (mín), C-0.85 (mín), Mn-0.6 (mín), P-0.04 (máx), S-0.05 (máx)
Aleación 4027	Fe-98.08 (mín), C-0.25 (mín), Mn-0.7 (mín), Mo-0.2 (mín), P-0.035 (máx), S-0.04 (máx), Si-0.15 (mín)
Aleación 4140	Fe-96.785 (mín), C-0.38 (mín), Cr-0.8 (mín), Mn-0.7 (mín), Mo-0.15 (mín), P-0.035 (máx), S-0.04 (máx), Si-0.15 (mín)
Aleación 4340	Fe-96, C-0.37 (mín), Cr-0.7 (mín), Mn-0.7, Mo-0.2, Ni-1.83, P-0.035 (máx), S-0.04 (máx), Si-0.23
Aleación 5140	Fe-98, C-0.38 (mín), Cr-0.8, Mn-0.8, P-0.035 (máx), S-0.04 (máx), Si-0.23

(*continúa*)

Aceros inóxidables	
Aleación 302	Fe-70, C-0.15 (máx), Cr-18, Mn-2 (máx), Ni-9, P-0.045 (máx), S-0.03 (máx), Si-1 (máx)
Aleación 316	Fe-62, C-0.08, Cr-18 (máx), Mn-2, Mo-2 (máx), Ni-14 (máx), P-0.045, S-0.03, Si-1
Aleación 405	Fe-85, Al-0.2, C-0.08 (máx), Cr-13, Mn-1 (máx), P-0.04 (máx), S-0.03 (máx), Si-1 (máx)
Aleación 434	Fe-81, C-0.12 (máx), Cr-16, Mn-1 (máx), Mo-1, P-0.04 (máx), S-0.03 (máx), Si-1 (máx)
Aleación 660	Fe-56, Al-0.035 (máx), B-0.001 (mín), C-0.08 (máx), Cr-13.5 (mín), Cu-0.25 (máx), Mn-2 (máx), Ni-24 (mín), P-0.04 (máx), S-0.03 (máx), Si-1 (máx), Ti-1.9 (mín), V-0.1 (mín)
Aleación 17-7PH	Al-0.75 (mín), C-0.09 (máx), Cr-16 (mín), Mn-1 (máx), Ni-6.5 (mín), P-0.04 (máx), S-0.04 (máx), Si-1 (máx)
Hierros fundidos	
Fundición gris (tal cual)	C-3.25 (mín), Cr-0.05 (mín), Cu-0.15 (mín), Mn-0.5 (mín), Mo-0.05 (mín), Ni-0.05 (mín), P-0.12 (máx), S-0.15 (máx), Si-2.3 (máx)
Hierros fundidos dúctiles	Fe-90.68 (mín), C-3 (mín), Ce-0.005 (mín), Cr-0.03 (mín), Cu-0.15 (mín), Mg-0.03 (mín), Mn-0.15 (mín), Mo-0.01 (mín), Ni-0.05 (mín), P-0.08 (máx), S-0.002 (máx), Si-2.8 (máx)
Aleaciones de aluminio	
Aleación 2024	Fe-0.5 (máx), Al-90.7 (mín), Cr-0.1 (máx), Cu-3.8 (mín), Mg-1.2 (máx), Mn-0.3 (máx), Otro, cada uno -0.05 (máx), Otro, total-0.15 (máx), Si-0.5 (máx), Ti-0.15 (máx), Zn-0.25 (máx)
Aleación 6061	Fe-0.7 (máx), Al-95.8 (mín), Cr-0.35 (máx), Cu-0.15 (mín), Mg-1.2 (máx), Mn-0.15 (máx), Otro, cada uno -0.05 (máx), Otro, total-0.15 (máx), Si-0.8 (máx), Ti-0.15 (máx), Zn-0.25 (máx)
Aleación 7075	Fe-0.5 (máx), Al-87.1 (mín), Cr-0.18 (máx), Cu-1.2 (mín), Mg-2.9 (máx), Mn-0.3 (máx), Otro, cada uno -0.05 (máx), Otro, total-0.15 (máx), Si-0.4 (máx), Ti-0.2 (máx), Zn-6.1 (máx)
Aleaciones de cobre	
Cobre electrolítico bien refinado, (C11000)	Cu-99.9, O-0.04
Berilio cobre, (C17000)	Be-1.6 (mín), Co + Ni-0.2 (mín), Co + Ni + Fe-0.6 (máx), Cu-98.1
Latón para cartucho, (C26000)	Cu-68.5, Fe-0.05 (máx), Otro-0.15 (máx), Pb-0.07 (máx), Zn-28.5 (mín)
Metal de Muntz, (C28000)	Cu-59 (mín), Fe-0.07 (máx), Pb-0.3 (máx), Zn-40

(*continúa*)

Latón de maquinado rápido, (C36000)	Cu-60 (mín), Fe-0.35 (máx), Otro-0.5 (máx), Pb-3.7 (máx), Zn-35.5 (mín)
Cromo cobre, (C18500)	Ag-0.08 (mín), Cr-0.4 (mín), Cu-99.3, Li-0.04 (máx), P-0.04 (máx), Pb-0.015 (máx)
Bronce 90-10, (C22000)	Cu-89 (mín), Fe-0.05 (máx), Pb-0.05 (máx), Zn-10
Aleaciones de magnesio	
Aleación AZ31B	Al-2.5 (mín), Ca-0.04 (máx), Cu-0.05 (máx), Fe-0.005 (máx), Mg-97, Mn-0.2 (mín), Ni-0.005 (máx), Si-0.1 (máx), Zn-0.6 (mín)
Aleación AZ63	Al-5.3 (mín), Ca-0.25 (máx), Mg-91, Mn-0.15 (mín), Ni-0.01 (máx), Si-0.3 (máx), Zn-2.5 (mín)
Aleación AZ91E	Al-8.3 (mín), Cu-0.03 (máx), Fe-0.005 (máx), Mg-90, Mn-0.13 (mín), Ni-0.002 (máx), Si-0.1 (máx), Zn-0.35 (mín)
Aleaciones de níquel	
Níquel-comercialmente puro	Ni-99.9%
Níquel plata 65-18 (752)	Cu-53.5 (mín), Fe-0.25 (máx), Mn-0.5, Ni-16.5 (mín), Otro-0.5, Pb-0.1, Zn-22.65 (mín)
Cuproníquel 30(715)	Cu-70, Ni-30
Aleaciones de titanio	
Titanio-comercialmente puro	
Aleación Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo	Al-6, Mo-0.8, Nb-2, Ta-1, Ti-90
Aleaciones misceláneas	
Aleación de kovar	C-0.02 (máx), Co-17, Fe-53, Mn-0.3, Ni-29, Si-0.2
Invar	
Aleación 32-5	C-0.02, Co-5.5, Fe-62, Mn-0.4, Ni-32, Si-0.25
Aleación 36	C-0.02, Fe-63, Mn-0.35, Ni-36, Si-0.2
Haynes 25	C-0.1, Co-51, Cr-20, Fe-3 (máx), Mn-1.5, Ni-10, Si-0.4 (máx), W-15
Biodur	C-0.02 (mín), Co-66, Cr-26 (mín), Mo-5 (mín), N-0.15 (mín)
Aleación de Co-Cr-Ni	Be-0.1 (máx), C-0.15 (máx), Co-39 (mín), Cr-19 (mín), Fe-16, Mn-1.5 (mín), Mo-6 (mín), Ni-14 (mín)
INCONEL (lamínada en frío)	Al-0.6 (máx), B-0.006 (máx), C-0.3 (máx), Co-0.1 (máx), Cr-17.5 (máx), Cu-0.35 (máx), Fe-38, Mn-0.35 (máx), Nb-2.5 (mín), Ni-44 (máx), P-0.02, S-0.015 (máx), Si-0.35 (máx), Ti-0.4 (máx)

(*continúa*)

INCOLOY 903	Al-0.9, Co-15, Fe-42, Nb-3, Ni-38, Ti-1.4
INCONEL 725 (recocida)	Al-0.5 (máx), C-0.03 (máx), Cr-22.5 (máx), Fe-9, Mn-0.35 (máx), Mo-7 (mín), Nb-2.75 (mín), Ni-59 (máx), P-0.015 (máx), S-0.01 (máx), Si-0.2 (máx), Ti-1.7 (máx)

COSTO Y COSTO RELATIVO DE ALGUNOS MATERIALES SELECCIONADOS

Materiales		Costo US$/lb	Costo relativo (basado en acero 1020)
Aceros al carbón y de baja aleación			
Aleación 1006	Trefilada en frío	2.91	0.43
Aleación 1020	Recocida	6.74	1.00
Aleación 1040	Trefilada en frío	2.14	0.32
Aleación 1090	Recocida	7.77	1.15
Aleación 4140	Normalizada	3.36	0.50
Aceros inoxidables			
Aleación 302	Laminada en frío	9	1.34
Aleación 316	Templada blanda	17.87	2.65
Aleación 405	Laminada en frío Recocida	394.79	58.57
Aleación 17-7PH	Laminada en frío	16.39	2.43
Hierros fundidos			
Hierros fundidos grises (al fundirse)	ASTM clase 35	7.42	1.10
Aleaciones de aluminio			
Aleación 2024	Con tratamiento T3	17.5	2.60
Aleación 6061	Con tratamiento T4	10.25	1.52
Aleación 7075	Con tratamiento T6	19.06	2.83

(*continúa*)

Aleaciones de cobre			
Cobre electrolítico bien refinado, (C11000)	Trabajado en frío	6.6	0.98
Latón para cartucho, (C26000)	Con tratamiento H00	29.59	4.39
Metal de Muntz, (C28000)	Con tratamiento H00	8.68	1.29
Latón de maquinado rápido, (C36000)	Con tratamiento H02	6.24	0.93
Bronce 90-10, (C22000)	Con tratamiento H01	13.53	2.01
Aleaciones de magnesio			
Aleación AZ31B	Laminada dura	11.06	1.64
Aleaciones de níquel			
Níquel-comercialmente puro	Al fundirse	39.02	5.79
Aleaciones de titanio			
Titanio-comercialmente puro	Al fundirse	57.77	8.57
Aleaciones misceláneas			
Invar	Aleación 32-5 (extraída en frío)	15	2.23
Haynes 25	Laminada y recocida en frío	40	5.93
Biodur	INCONEL (laminada en frío)	38	5.64
	INCONEL 725 (recocida)	14	2.08
	Berilio S-200	400	59.35
	Tungsteno	4	0.59
	Tantalio	37	5.49
	Zinc	0.5	0.07
Metales nobles			
	Oro	7105	1054.15
	Iridio	2684	398.22
	Plata	102	15.13
	Platino, recocido	13531	2007.57
Polímeros			
Elastómeros	Hule de butadieno estireno (BE)	6.4	0.95
	Hule natural (no vulcanizado)	31	4.60
	Hule de nitrilo	5.07	0.75

(*continúa*)

Resinas epóxicas			
	Resina epóxica (no reforzada)	5	0.74
	Nailon 66 (no reforzado)	14.2	2.11
	Resina fenólica (no reforzada)	10	1.48
	Tereftalato de polibutileno (PBT)	5	0.74
Policarbonato (PC)			
	Moldeado	7.47	1.11
	Poliéster (rígido)	7.25	1.08
Polietileno (moldeado)			
	Densidad media	11.3	1.68
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)			
	Moldeado	13.84	2.05
Polimetilmetacrilato (PMMA)			
	No reforzado	3.25	0.48
Polipropileno (PP)			
	No reforzado	2.58	0.38
	Poliestireno	15.05	2.23
	Politetrafluoroetileno (PTFE)	22	3.26
Policloruro de vinilo (PVC)			
	No reforzado	15.12	2.24
	Polisulfona	24.75	3.67
Cerámicas, grafito y materiales semiconductores			
Óxido de aluminio			
	Alumina a 99.9%	129.57	19.22
Diamante			
	Natural	40000	5934.72
	Arseniuro de galio	1500	222.55
Vidrio			
	Vidrio de borosilicato	10	1.48
	Vidrio de sílice	2.25	0.33
	Carbón de grafito	8	1.19
	Sílice fundida	189	28.04
Carburo de silicio			
	Sinterizado	20	2.97
Fibras			
	Fibra de vidrio E genérica	2.2	0.33
	Precursor de fibra de carbón	30	4.45
Materiales compuestos			
	Epoxi/vidrio CMC	18	2.67
	Epoxi/compuesto de fibra de carbón	34	5.04
	Policarbonato reforzado con fibra de aramida	51	7.57

Notas:
1. Las propiedades mecánicas de los materiales son las comunes. Varían de manera considerable dependiendo del proceso de manufactura implicado y de las condiciones de prueba.
2. El costo de los materiales corresponde a cantidades pequeñas (alrededor de 10 lbs). La mayoría de los datos de costo son de un solo distribuidor. El costo puede ser mucho menor (hasta 80% menor) si el material se compra a un fabricante o distribuidor en grandes cantidades (miles de libras).

APÉNDICE II

Algunas propiedades de elementos seleccionados

Elemento	Símbolo	Punto de fusión, °C	Densidad,* g/cm^3	Radio atómico, nm	Estructura cristalina† (20°C)	Constantes de la red 20°C, nm	
						a	c
Aluminio	Al	660	2.70	0.143	FCC	0.40496	
Antimonio	Sb	630	6.70	0.138	Romboédrico	0.45067	
Arsénico	As	817	5.72	0.125	Romboédrico‡	0.4131	
Bario	Ba	714	3.5	0.217	BCC‡	0.5019	
Berilio	Be	1278	1.85	0.113	HCP‡	0.22856	0.35832
Boro	B	2030	2.34	0.097	Ortorrómbico		
Bromo	Br	−7.2	3.12	0.119	Ortorrómbico		
Cadmio	Cd	321	8.65	0.148	HCP‡	0.29788	0.561667
Calcio	Ca	846	1.55	0.197	FCC‡	0.5582	
Carbón (grafito)	C	3550	2.25	0.077	Hexagonal	0.24612	0.67078
Cesio	Cs	28.7	1.87	0.190	BCC		
Cloro	Cl	−101	1.9	0.099	Tetragonal		
Cromo	Cr	1875	7.19	0.128	BCC‡	0.28846	
Cobalto	Co	1498	8.85	0.125	HCP‡	0.2506	0.4069
Cobre	Cu	1083	8.96	0.128	FCC	0.36147	
Flúor	F	−220	1.3	0.071			
Galio	Ga	29.8	5.91	0.135	Ortorrómbico		
Germanio	Ge	937	5.32	0.139	Diamante cúbico	0.56576	
Oro	Au	1063	19.3	0.144	FCC	0.40788	
Helio	He	−270	. . .	. . .	HCP		
Hidrógeno	H	−259	. . .	0.046	Hexagonal		
Indio	In	157	7.31	0.162	FC tetragonal	0.45979	0.49467
Yodo	I	114	4.94	0.136	Ortorrómbico		
Iridio	Ir	2454	22.4	0.135	FCC	0.38389	
Hierro	Fe	1536	7.87	0.124	BCC‡	0.28664	
Plomo	Pb	327	11.34	0.175	FCC	0.49502	
Litio	Li	180	0.53	0.157	BCC	0.35092	

(*continúa*)

Elemento	Símbolo	Punto de fusión, °C	Densidad,* g/cm³	Radio atómico, nm	Estructura cristalina† (20°C)	Constantes de la red 20°C, nm	
						a	c
Magnesio	Mg	650	1.74	0.160	HCP	0.32094	0.52105
Manganeso	Mn	1245	7.43	0.118	Cúbica‡	0.89139	
Mercurio	Hg	−38.4	14.19	0.155	Romboédrica		
Molibdeno	Mo	2610	10.2	0.140	BCC	0.31468	
Neón	Ne	−248.7	1.45	0.160	FCC		
Níquel	Ni	1453	8.9	0.125	FCC	0.35236	
Niobio	Nb	2415	8.6	0.143	BCC	0.33007	
Nitrógeno	N	−240	1.03	0.071	Hexagonal‡		
Osmio	Os	2700	22.57	0.135	HCP	0.27353	0.43191
Oxígeno	O	−218	1.43	0.060	Cúbica‡		
Paladio	Pd	1552	12.0	0.137	FCC	0.38907	
Fósforo (blanco)	P	44.2	1.83	0.110	Cúbica‡		
Platino	Pt	1769	21.4	0.139	FCC	0.39239	
Potasio	K	63.9	0.86	0.238	BCC	0.5344	
Renio	Re	3180	21.0	0.138	HCP	0.27609	0.44583
Rodio	Rh	1966	12.4	0.134	FCC	0.38044	
Rutenio	Ru	2500	12.2	0.125	HCP	0.27038	0.42816
Escandio	Sc	1539	2.99	0.160	FCC	0.4541	
Silicio	Si	1410	2.34	0.117	Diamante cúbico	0.54282	
Plata	Ag	961	10.5	0.144	FCC	0.40856	
Sodio	Na	97.8	0.97	0.192	BCC	0.42906	
Estroncio	Sr	76.8	2.60	0.215	FCC‡	0.6087	
Azufre (amarillo)	S	119	2.07	0.104	Ortorrómbica		
Tantalio	Ta	2996	16.6	0.143	BCC	0.33026	
Estaño	Sn	232	7.30	0.158	Tetragonal‡	0.58311	0.31817
Titanio	Ti	1668	4.51	0.147	HCP‡	0.29504	0.46833
Tungsteno	W	3410	19.3	0.141	BCC	0.31648	
Uranio	U	1132	19.0	0.138	Ortorrómbica‡	0.2858	0.4955
Vanadio	V	1900	6.1	0.136	BCC	0.3039	
Zinc	Zn	419.5	7.13	0.137	HCP	0.26649	0.49470
Zirconio	Zr	1852	6.49	0.160	HCP‡	0.32312	0.51477

*Densidad del sólido a 20°C.
†b = 0.5877 nm.
‡Otras estructuras cristalinas existen a diferentes temperaturas.

APÉNDICE III

Radios iónicos[1] de los elementos

[1] Los radios iónicos pueden variar en cristales diferentes debido a muchos factores.

Número atómico	Elemento (símbolo)	Ion	Radio iónico, nm	Número atómico	Elemento (símbolo)	Ion	Radio iónico, nm
1	H	H^-	0.154	23	V	V^{3+}	0.065
2	He					V^{4+}	0.061
3	Li	Li^+	0.078			V^{5+}	~0.04
4	Be	Be^{2+}	0.034	24	Cr	Cr^{3+}	0.064
5	B	B^{3+}	0.02			Cr^{6+}	0.03–0.04
6	C	C^{4+}	<0.02	25	Mn	Mn^{2+}	0.091
7	N	N^{5+}	0.01–0.02			Mn^{3+}	0.070
8	O	O^{2-}	0.132			Mn^{4+}	0.052
9	F	F^-	0.133	26	Fe	Fe^{2+}	0.087
10	Ne					Fe^{3+}	0.067
11	Na	Na^+	0.098	27	Co	Co^{2+}	0.082
12	Mg	Mg^{2+}	0.078			Co^{3+}	0.065
13	Al	Al^{3+}	0.057	28	Ni	Ni^{2+}	0.078
14	Si	Si^{4-}	0.198	29	Cu	Cu^+	0.096
		Si^{4+}	0.039	30	Zn	Zn^{2+}	0.083
15	P	P^{5+}	0.03–0.04	31	Ga	Ga^{3+}	0.062
16	S	S^{2-}	0.174	32	Ge	Ge^{4+}	0.044
		S^{6+}	0.034	33	As	As^{3+}	0.069
17	Cl	Cl^-	0.181			As^{5+}	~0.04
18	Ar			34	Se	Se^{2-}	0.191
19	K	K^+	0.133			Se^{6+}	0.03–0.04
20	Ca	Ca^{2+}	0.106	35	Br	Br^-	0.196
21	Sc	Sc^{2+}	0.083	36	Kr		
22	Ti	Ti^{2+}	0.076	37	Rb	Rb^+	0.149
		Ti^{3+}	0.069	38	Sr	Sr^{2+}	0.127
		Ti^{4+}	0.064				

(*continúa*)

Número atómico	Elemento (símbolo)	Ion	Radio iónico, nm
39	Y	Y^{3+}	0.106
40	Zr	Zr^{4+}	0.087
41	Nb	Nb^{4+}	0.069
		Nb^{5+}	0.069
42	Mo	Mo^{4+}	0.068
		Mo^{6+}	0.065
44	Ru	Ru^{4+}	0.065
45	Rh	Rh^{3+}	0.068
		Rh^{4+}	0.065
46	Pd	Pd^{2+}	0.050
47	Ag	Ag^{+}	0.113
48	Cd	Cd^{2+}	0.103
49	In	In^{3+}	0.092
50	Sn	Sn^{4-}	0.215
		Sn^{4+}	0.074
51	Sb	Sb^{3+}	0.090
52	Te	Te^{2-}	0.211
		Te^{4+}	0.089
53	I	I^{-}	0.220
		I^{5+}	0.094
54	Xe		
55	Cs	Cs^{+}	0.165
56	Ba	Ba^{2+}	0.143
57	La	La^{3+}	0.122
58	Ce	Ce^{3+}	0.118
		Ce^{4+}	0.102
59	Pr	Pr^{3+}	0.116
		Pr^{4+}	0.100
60	Nd	Nd^{3+}	0.115
61	Pm	Pm^{3+}	0.106
62	Sm	Sm^{3+}	0.113
63	Eu	Eu^{3+}	0.113
64	Gd	Gd^{3+}	0.111
65	Tb	Tb^{3+}	0.109
		Tb^{4+}	0.089
66	Dy	Dy^{3+}	0.107
67	Ho	Ho^{3+}	0.105
68	Er	Er^{3+}	0.104
69	Tm	Tm^{3+}	0.104
70	Yb	Yb^{3+}	0.100
71	Lu	Lu^{3+}	0.099
72	Hf	Hf^{4+}	0.084
73	Ta	Ta^{5+}	0.068
74	W	W^{4+}	0.068
		W^{6+}	0.065
75	Re	Re^{4+}	0.072
76	Os	Os^{4+}	0.067
77	Ir	Ir^{4+}	0.066
78	Pt	Pt^{4+}	0.052
		Pt^{4+}	0.055
79	Au	Au^{+}	0.137
80	Hg	Hg^{2+}	0.112
81	Tl	Tl^{+}	0.149
		Tl^{3+}	0.106
82	Pb	Pb^{4-}	0.215
		Pb^{2+}	0.132
		Pb^{4+}	0.084
83	Bi	Bi^{3+}	0.120
84	Po		
85	At		
86	Rn		
87	Fr		
88	Ra	Ra^{+}	0.152
89	Ac		
90	Th	Th^{4+}	0.110
91	Pa		
92	U	U^{4+}	0.105

*Los radios iónicos pueden variar en cristales diferentes debido a muchos factores.

Fuente: C. J. Smithells (ed.), "Metals Reference Book", 5a. ed., Butterworth, 1976.

TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA Y TEMPERATURA DE FUSIÓN DE POLÍMEROS SELECCIONADOS

Polímero	Temperatura de transición vítrea (°C)	Temperatura de fusión (°C)
Nailon 66	50	265
Nailon 12	42	179
Tereftalato de polibutileno (PBT)	22	225
Policarbonato	150	265
Polieteretercetona (PEEC)	157	374
Polietilentereftalato (PET)	69	265
Polietileno	−78	100
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	110	105
Polimetilmetacrilato (PMMA)	38	160
Polipropileno (PP)	−8	176
Poliestireno	100	240
Politetrafluoroetileno (PTFE)	−20	327
Policloruro de vinilo (PVC)	87	227
Polivinil etil éter	−43	86
Polifluoruro de vinilo	40	200
Acrilonitrilo-estireno	120	120
Acetato de celulosa	190	230
Acrinolitrilo	100	317
Poliacetal	−30	183
Sulfuro de polifenileno moldeado	118	275
Polisulfona	185	190
Policloropreno	−50	80
Polidimetil siloxano	−123	−40
Polivinilpirrolidona	86	375
Cloruro de polivinilideno	−18	198

APÉNDICE IV

Cantidades físicas selectas y sus unidades

Cantidad	Símbolo	Unidad	Abreviatura
Longitud	l	pulgada	in
		metro	m
Longitud de onda	λ	metro	m
Masa	m	kilogramo	kg
Tiempo	t	segundo	s
Temperatura	T	grado Celsius	°C
		grado Fahrenheit	°F
		Kelvin	K
Frecuencia	v	hertz	Hz $[s^{-1}]$
Fuerza	F	newton	N $[kg \cdot m \cdot s^{-2}]$
Esfuerzo:			
De tensión	σ	pascal	Pa $[N \cdot m^{-2}]$
De corte	τ	libras por pulgada cuadrada	lb/in^2 o psi
Energía, trabajo, cantidad de calor		joule	J $[N \cdot m]$
Potencia		watt	W $[J \cdot s^{-1}]$
Flujo de corriente	i	ampere	A
Carga eléctrica	q	coulomb	C $[A \cdot s]$
Diferencia de potencial, fuerza electromotriz	V, E	volt	V
Resistencia eléctrica	R	ohm	Ω $[V \cdot A^{-1}]$
Inducción magnética	B	tesla	T $[V \cdot s \cdot m^{-2}]$

Alfabeto griego

Nombre	Minúscula	Mayúscula	Nombre	Minúscula	Mayúscula
Alfa	α	A	Nu	ν	N
Beta	β	B	Xi	ξ	Ξ
Gamma	γ	Γ	Omicron	o	O
Delta	δ	Δ	Pi	π	Π
Epsilon	ε	E	Rho	ρ	P
Zeta	ζ	Z	Sigma	σ	Σ
Eta	η	H	Tau	τ	T
Teta	θ	Θ	Upsilon	υ	Υ
Iota	ι	I	Phi	ϕ	Φ
Kappa	κ	K	Chi	χ	X
Lambda	λ	Λ	Psi	ψ	Ψ
Mu	μ	M	Omega	ω	Ω

Prefijos de unidades del SI

Múltiplo	Prefijo	Símbolo
10^{-12}	pico	p
10^{-9}	nano	n
10^{-6}	micro	μ
10^{-3}	mili	m
10^{-2}	centi	c
10^{-1}	deci	d
10^{1}	deca	da
10^{2}	hecto	h
10^{3}	kilo	k
10^{6}	mega	M
10^{9}	giga	G
10^{12}	tera	T

Ejemplo: 1 kilómetro = 1 km = 10^3 metros.

REFERENCIAS PARA ESTUDIOS ADICIONALES POR CAPÍTULO

Capítulo 1

Annual Review of Materials Science. Annual Reviews, Inc. Palo Alto, CA.

Bever, M. B. (ed.) *Encyclopedia of Materials Science and Engineering.* MIT Press-Pergamon, Cambridge, 1986.

Canby, T. Y. "Advanced Materials-Reshaping Our Lives". *Nat. Geog*., 176(6), 1989, p. 746.

Engineering Materials Handbook. Vol. 1: *Composites,* ASM International, 1988.

Engineering Materials Handbook. Vol. 2: *Engineering Plastics,* ASM International, 1988.

Engineering Materials Handbook. Vol. 4: *Ceramics and Glasses,* ASM International, 1991.

Fuentes de Internet:
www.nasa.gov
www.designinsite.dk/htmsider/inspmat.htm

Jackie Y. Ying, *Nanostructured Materials,* Academic Press, 2001.

"Materials Engineering 2000 and Beyond: Strategies for Competitiveness". *Advanced Materials and Processes* 145(1), 1994.

"Materials Issue". *Sci. Am*., 255(4), 1986.

Metals Handbook, 2a. edición, ASM International, 1998.

M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design,* Butterworth-Heinemann, 1996.

M. Madou, *Fundamentals of Microfabrication,* CRC Press, 1997.

Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Application, Editores: A. S. Edelstein y R. C. Cammarata, Institute of Physics Publishing, 2002.

Revista *National Geographic* , 2000–2001.

Wang, Y. *et al*., *High Tensile Ductility in a Nanostructured Metal, Letters to Nature,* 2002.

Capítulo 2

Binnig, G., H. Rohrer, *et al*. en *Physical Review Letters,* v 50 pp. 120-24 (1983).

http://ufrphy.lbhp.jussieu.fr/nano/

Brown, T. L., H. E. LeMay y B. E. Bursten. *Chemistry*. 8a. ed. Prentice-Hall, 2000.

Chang, R. *Chemistry*. 5a. ed. McGraw-Hill, 1994.

http://www.molec.com/products_consumables.html#STM

H. Dai, J. H. Hafner, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, R. E. Smalley, Nature 384, 147-150 (1996).

http://www.omicron.de/index2.html?/results/stm_image_of_chromium_decorated_steps_of_cu_111/~Omicron

http://www.almaden.ibm.com/almaden/media/image_mirage.html

Chang, R. *General Chemistry*. 4a. ed. McGraw-Hill, 1990.

Ebbing, D. D. *General Chemistry*. 5a. ed. Houghton Mifflin, 1996.

McWeeny, R. *Coulson's Valence*. 3a. ed. Oxford University Press, 1979.

Pauling, L. *The Nature of the Chemical Bond.* 3a. ed. Cornell University Press, 1960.

Smith, W. F. *T. M. S. Fall Meeting*. 11 de octubre, 2000. Resumen solamente.

Capítulo 3

Barrett, C. S. y T. Massalski. *Structure of Metals.* 3a. ed. Pergamon Press, 1980.

Cullity, B. D. *Elements of X-Ray Diffraction*. 2a. ed. Addison-Wesley, 1978.

Wilson, A. J. C. *Elements of X-Ray Cystallography*. Addison-Wesley, 1970.

Capítulos 4 y 5

Flemings, M. *Solidification Processing*. McGraw-Hill, 1974.

Hirth J. P., y J. Lothe. *Theory of Dislocations*. 2a. ed. Wiley, 1982.

Krauss, G. (ed.) *Carburizing: Processing and Performance*. ASM International, 1989.

Minkoff, I. *Solidification and Cast Structures*. Wiley, 1986.

Shewmon, P. G. *Diffusion in Solids*. 2a. ed. Minerals, Mining y Materials Society, 1989.

Capítulos 6 y 7

ASM Handbook of Failure Analysis and Prevention. Vol. 11. 1992.

ASM Handbook of Materials Selection and Design. Vol. 20. 1997.

Courtney, T. H. *Mechanical Behavior of Materials.* McGraw-Hill, 1989.

Courtney, T. H. *Mechanical Behavior of Materials.* 2a. ed. 2000.

Dieter, G. E. *Mechanical Metallurgy.* 3a. ed. McGraw-Hill, 1986.

Hertzberg, R. W. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials.* 3a. ed. Wiley, 1989.

http://www.wtec.org/loyola/nano/06_02.htm

Hertzberg, R. W. *Deformation and Fracture Mechanics of Materials.* 4a. ed. 1972.

K. S. Kumar, H. Van Swygenhoven, S. Suresh, *Mechanical behavior of nanocrystalline metals and alloys,* Acta Materialia, 51, 5743-5774, 2003

Schaffer *et al*. *"The Science and Design of Engineering Materials",* McGraw-Hill, 1999.

T. Hanlon, Y. -N. Kwon, S. Suresh, *Grain size effects on the fatigue response of nanocrystalline metals,* Scripta Materialia, 49, 675-680, 2003

Wang *et al*., *High Tensile Ductility in a nanostructured Metal", Nature.* Vol. 419, 2002.

Wulpi, J. D., *"Understanding How Components Fail",* ASM, 2000.

Capítulo 8

Massalski, T. B. *Binary Alloy Phase Diagrams*. ASM International, 1986.

Massalski, T. B. *Binary Alloy Phase Diagrams*. 3a. ed. ASM International.

Rhines, F. *Phase Diagrams in Metallurgy*. McGraw-Hill, 1956.

Capítulo 9

Krauss, G. *Steels: Heat Treatment and Processing Principles*. ASM International, 1990.

The Making, Shaping and Heat Treatment of Steel. 11a. ed. Vols. 1 a 3. The AISE Steel Foundation, 1999-2001.

Smith, W. F. *Structure and Properties of Engineering Alloys.* 2a. ed. McGraw-Hill, 1993.

Steel, Annual Statistical Report. American Iron and Steel Institute, 2001.

Walker, J. L. *et al*. (ed.) *Alloying*. ASM International, 1988.

Capítulo 10

Benedict, G. M. y B. L. Goodall. *Metallocene-Catalyzed Polymers*. Plastics Design Library, 1998.

"Engineering Plastics". Vol. 2, *Engineered Materials Handbook*. ASM International, 1988.

Kaufman, H. S., y J. J. Falcetta (eds.) *Introduction to Polymer Science and Technology*. Wiley, 1977.

Kohen, M. *Nylon Handbook*. Hanser, 1998.

Moore, E. P. *Polypropylene Handbook*. Hanser, 1996.

Moore, G. R., y D. E. Kline, *Properties and Processing of Polymers for Engineers*. Prentice-Hall, 1984.

Salamone, J. C. (ed.) *Polymeric Materials Encyclopedia*. Vols. 1 a 10. CRC Press, 1996.

Capítulo 11

Barsoum, M. *Fundamentals of Ceramics*. McGraw-Hill, 1997.

Bhusan, B. (ed.) *Handbook of Nanotechnology,* Springer, 2004.

"Ceramics and Glasses", Vol. 4, *Engineered Materials Handbook*. ASM International, 1991.

Chiang, Y., D. P. Birnie, y W. D. Kingery. *Physical Ceramics*. Wiley, 1997.

Davis, J. R. (ed.) *Handbook of Materials for Medical Devices,* ASM International, 2003.

Edelstein, A. S. y Cammarata, R. C. (eds.) *Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Application,* Institute of Physics Publishing, 2002.

Engineered Materials Handbook. Vol. 4: *Ceramics and Glasses*. ASM International, 1991.

Handbook of Materials for Medical Devices, J. R. Davis, Editor, ASM International, 2003.

Handbook of Nanotechnology, Editor: B. Bhusan, Springer, 2004.

J. A, Jacobs y T. F. Kilduf, *Engineering Materials Technology,* 5a. ed., Prentice-Hall, 2004.

Jacobs, J. A. y Kilduf, T. F. *Engineering Materials Technology,* 5a. ed., Prentice-Hall, 2004.

Kingery, W. D., H. K. Bowen, y D. R. Uhlmann. *Introduction to Ceramics*. 2a. ed. Wiley, 1976.

Medical Device Materials, Proceedings of the Materials and Processes for Medical Devices Conference, S. Shrivastava, Editor, ASM International, 2003.

Mobley, J. (ed.). *The American Ceramic Society, 100 Years*. American Ceramic Society, 1998.

Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Application, Editores: A. S. Edelstein y R. C. Cammarata, Institute of Physics Publishing, 2002.

Nanostructured Materials, Editor: Jackie Y. Ying, Academic Press, 2001.

Shrivastava, S. (ed.) *Medical Device Materials,* Proceedings of the Materials and Processes for Medical Devices Conference, ASM International, 2003.

Wachtman, J. B. (ed.) *Ceramic Innovations in the Twenthieth Century*. The American Ceramic Society, 1999.

Wachtman, J. B. (ed.) *Structural Ceramics*. Academic, 1989.

Ying, J. Y. (ed.) *Nanostructured Materials,* Academic Press, 2001.

Capítulo 12

Chawla, K. K. *Composite Materials*. Springer-Verlag, 1987.

"Composites". Vol. 1, *Engineered Materials Handbook*. ASM International, 1987.

Engineered Materials Handbook. Vol. 1: *Composites*. ASM International, 1987.

Engineers' Guide to Composite Materials. ASM International, 1987.

Handbook of Materials for Medical Devices, J. R. Davis, Editor, ASM International, 2003.

Harris, B. *Engineering Composite Materials*. Institute of Metals (Londres), 1986.

Metals Handbook. Vol. 21: *Composites*. ASM International, 2001.

M. Nordin y V. H. Frankel, *Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System,* 3a. ed., Lippincot, Williams, y Wilkins, 2001.

Nanostructured Materials, Editor: Jackie Y. Ying, Academic Press, 2001.

http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/BoneTrab.html

Capítulo 13

"Corrosion". Vol. 13, *Metals Handbook*. 9a. ed. ASM International, 1987.

Fontana, M. G. *Corrosion Engineering*. 3a. ed. McGraw-Hill, 1986.

Jones, D. A. *Corrosion*. 2a. ed. Prentice-Hall, 1996.

Uhlig, H. H. *Corrosion and Corrosion Control*. 3a. ed. Wiley, 1985.

Capítulo 14

Binnig, G., H. Rohrer, *et al*. en *Physical Review Letters,* v 50 pp. 120-24 (1983).

http://ufrphy.lbhp.jussieu.fr/nano/

H. Dai, J. H. Hafner, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, R. E. Smalley, Nature 384, 147–150 (1996).

http://www.omicron.de/index2.html?/results/stm_image_of_chromium_decorated_steps_of_cu_111/~Omicron

http://www.almaden.ibm.com/almaden/media/image_mirage.html

Hodges, D. A. y H. G. Jackson. *Analysis and Design of Digital Integrated Circuits*. 2a. ed. McGraw-Hill, 1988.

Mahajan, S. y K. S. Sree Harsha. *Principles of Growth and Processing of Semiconductors*. McGraw-Hill, 1999.

http://www.molec.com/products_consumables.html#STM

Nalwa, H. S. (ed.) *Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices*. Vol. 1: *Semiconductors*. Academic Press, 2001.

Sze, S. M. (ed.) *VLSI Technology*. 2a. ed. McGraw-Hill, 1988.

Sze, S. M. *Semiconductor Devices*. Wiley, 1985.

Wolf, S. *Silicon Processing for the VLSI Era*. 2a. ed. Lattice Press, 2000.

Capítulo 15

Chafee, C. D. *The Rewiring of America*. Academic, 1988.

Hatfield, W. H. y J. H. Miller, *High Temperature Superconducting Materials*. Marcel Dekker, 1988.

Miller, S. E. y I. P. Kaminow. *Optical Fiber Communications II*. Academic Press, 1988.

Nalwa, H. S. (ed.) *Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices*. Vols. 3-8. Academic Press, 2001.

Capítulo 16

Chin, G. Y. y J. H. Wernick. “Magnetic Materials, Bulk”. Vol. 14, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 3a. ed. Wiley, 1981, p. 686.

Coey, M. *et al*. (eds.) *Advanced Hard and Soft Magnetic Materials*. Vol. 577. Materials Research Society, 1999.

Cullity, B. D. *Introduction to Magnetic Materials*. Addison-Wesley, 1972.

Livingston, J. *Electronic Properties of Engineering Materials*. Capítulo 5. Wiley, 1999.

Salsgiver, J. A. *et al*. (ed.) *Hard and Soft Magnetic Materials*. ASM International, 1987.

Los datos de las propiedades del material y de la temperatura de transición vítrea se obtuvieron de la siguiente lista de referencias

1. *ASM Handbooks.* Vol. 1, *Properties and selection*: *Irons, Steels and High performance alloys,* ASM International, Materials Park, OH.
2. *ASM Handbooks.* Vol. 2, *Properties and selection*: *Nonferrous alloys and special purpose metals,* ASM International, Materials Park, OH.
3. *ASM Handbooks.* Vol. 8, *Mechanical testing and evaluation,* ASM International, Materials Park, OH.
4. *ASM Handbooks.* Vol. 19, *Fatigue and Fracture,* ASM International, Materials Park, OH.
5. *ASM Handbooks.* Vol. 8, *composites,* ASM International, Materials Park, OH.
6. *ASM Metals handbook desk edition,* ASM International, Materials Park, OH.
7. *ASM Ready reference: Electrical and magnetic properties of materials.* ASM International, Materials Park, OH.
8. *ASM Engineered Materials reference Book,* ASM International, Materials Park, OH.
9. *Mechanical properties and testing of polymers: An A-Z reference (1999).* Redactado por G. M. Swallowe. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Países Bajos.
10. *Mechanical properties of polymers and composites.* Lawrence E. Nielsen y Robert F. Landel. (1994). Marcel Dekker Inc., Madison ave, Nueva York.
11. *Engineering polymer sourcebook.* Raymond B. Seymour (1990). McGraw-Hill Inc.
12. *Mechanical properties of ceramics.* John B. Watchman (1996). John Wiley and Sons Inc.
13. *Guide to Engineered Materials* (*A Special issue of Advanced Materials and processes*). Vol. 1 (1986). ASM International, Materials Park, OH.
14. *Guide to Engineered Materials* (*A Special issue of Advanced Materials and processes*). Vol. 2 (1987). ASM International, Materials Park, OH.
15. *Guide to Engineered Materials* (*A Special issue of Advanced Materials and processes*). Vol. 3 (1988). ASM International, Materials Park, OH.
16. *ASM Ready reference: Thermal properties of materials.* ASM International, Materials Park, OH.
17. *The mechanical properties of wood.* Wangaard, Frederick Field (1950), John Wiley and Sons Inc.
18. Documentos de datos del fabricante.

GLOSARIO

A

absorbancia la fracción de la luz incidente que es absorbida por un material.

acero al carbón aleación de hierro-carbón con 0.02 a 2 por ciento de C. Todos los aceros comerciales al carbón contienen alrededor de 0.3 a 0.9 por ciento de manganeso junto con impurezas de azufre, fósforo y silicio.

agregado material inerte mezclado con el cemento portland y agua para producir concreto. Las partículas más grandes se denominan agregado grueso (por ejemplo, la grava) y las más pequeñas reciben el nombre de agregado fino (por ejemplo, la arena).

aislante eléctrico material con una baja conductividad eléctrica. El polietileno es un conductor pobre y tiene una $\sigma_e = 10^{-15}$ a 10^{-17} $(\Omega \cdot m)^{-1}$.

albura la parte exterior del tallo de un árbol vivo que contiene algunas células vivas que almacenan nutrientes para el árbol.

aleación mezcla de dos o más metales o un metal (metales) y un no metal (no metales).

aleaciones con memoria de forma aleaciones metálicas que recuperan una forma previamente definida cuando se someten a un proceso de tratamiento térmico apropiado.

aleaciones con memoria de forma materiales que pueden ser deformados pero que regresan a su forma original después de un aumento de temperatura.

aleaciones de alnico (aluminio-níquel-cobalto) familia de aleaciones magnéticas permanentes que tienen la composición básica de Al, Ni y Co, y cerca de 25 a 50 por ciento de Fe. Una cantidad pequeña de Cu y Ti se agrega a algunas de estas aleaciones.

aleaciones de hierro-cromo-cobalto familia de aleaciones magnéticas permanentes que contienen alrededor de 30% de Cr-10 a 23% de Co y el hierro de balance. Estas aleaciones tienen la ventaja de ser formadas en frío a temperatura ambiente.

aleaciones de hierro-silicio aleaciones de Fe con 3 a 4% de Si que son materiales magnéticos blandos con altas inducciones por saturación. Estas aleaciones se usan en motores y transformadores de potencia y generadores de baja frecuencia.

aleaciones de níquel-hierro aleaciones magnéticas blandas de alta permeabilidad que se utilizan en aplicaciones eléctricas donde se requiere una alta sensibilidad, como es el caso del audio y de los transformadores de instrumentos. Dos composiciones fundamentales que se usan comúnmente son 50% Ni–50% Fe y 79% Ni–21% Fe.

aleaciones de tierras raras familia de aleaciones magnéticas permanentes con productos de energía extremadamente alta. $SmCo_5$ y $Sm(Co, Cu)_{7.4}$ son dos de las composiciones comerciales más importantes de estas aleaciones.

amorfo carencia de orden atómico de largo alcance.

anión un ión con una carga negativa.

ánodo el electrodo metálico en una celda electrolítica que se disuelve formando iones y que entrega electrones al circuito externo.

antiferromagnetismo tipo de magnetismo en el cual los dipolos magnéticos de los átomos se alinean en direcciones opuestas mediante un campo magnético aplicado de manera que no hay magnetización neta.

aplicación de refuerzo mediante aspersión proceso en el que se usa una pistola rociadora para producir un producto reforzado con fibra. En un tipo de proceso de aplicación por aspersión, se mezclan fibras desmenuzadas con resina plástica y se aplican con rocío dentro de un molde para formar una parte de material compuesto.

árboles de madera blanda árboles que tienen semillas expuestas y hojas de flecha (agujas). Son ejemplos el pino, abeto y pícea.

árboles de maderas duras árboles que tienen semillas cubiertas y hojas anchas. Ejemplos son el roble, maple y fresno.

asfalto bitumen consistente principalmente en hidrocarburos que tienen una amplia variedad de pesos moleculares. La mayoría de los asfaltos se obtienen de la refinación del petróleo.

atado (de fibras) colección de numerosas fibras en un manojo de tiras especificadas de acuerdo con el número de fibras que contiene (por ejemplo 6 000 fibras por estopa).

atenuación luminosa disminución en intensidad de la luz.

átomo la unidad básica de un elemento que puede experimentar cambio químico.

austemperizado un proceso de templado mediante el cual un acero en la condición austenítica se templa en un baño de líquido caliente (sal) a una temperatura apenas arriba de la M_s del acero, siendo mantenido en el baño hasta que la austenita del acero se transforma por completo, y después se enfría a temperatura ambiente. Con este proceso un acero eutectoide al carbón puede producirse en una condición bainítica total.

austenita (fase γ en el diagrama de fase del Fe-Fe_3C) una solución sólida intersticial de carbón en hierro FCC; la máxima solubilidad sólida del carbón en la austenita es de 2.0 por ciento.

austenitización calentamiento de un acero hasta el rango de temperatura de austenita de modo que su estructura se vuelve austenítica. La temperatura de austenitización variará dependiendo de la composición del acero.

autodifusión la migración de átomos en un material puro.

B

bainita mezcla de una ferrita α y partículas muy pequeñas de las partículas de Fe_3C producidas por la descomposición de austenita; una descomposición eutectoide no laminar producto de la austenita.

banda de conducción niveles de energía no llenos en los cuales los electrones pueden excitarse para volverse electrones de conducción. En los semiconductores y aisladores hay una brecha de energía entre la banda de valencia inferior llena y la banda de conducción vacía superior.

banda de valencia la banda de energía que contiene los electrones de valencia. En un conductor de la banda de valencia es también la banda de conducción. La banda de valencia en un metal conductor no está llena, y algunos electrones pueden ganar energía hasta llegar a los niveles dentro de la banda de valencia y convertirse en electrones conductores.

bandas de deslizamiento marcas de línea sobre la superficie de un metal debido al deslizamiento causado por deformación permanente.

bipolímero polímeros que se usan dentro del cuerpo humano para diversas aplicaciones quirúrgicas.

buckyball también conocida como Fullereno de Buckminister es una molécula de átomos de carbón (C_{60}) con forma de balón de futbol.

buckytubo estructura tubular hecha de átomos de carbono ligados entre sí por enlaces covalentes.

C

cadena de polímero un compuesto de alta masa molecular cuya estructura consiste en un gran número de unidades repetidas pequeñas llamadas *meros*. Los átomos de carbono conforman la mayor parte de los átomos de la cadena principal en casi todos los polímeros.

cambium el tejido que está localizado entre la madera y la corteza de un árbol y es capaz de tener división celular repetida.

campo crítico H_c el campo magnético sobre el cual desaparece la superconductividad.

campo crítico inferior H_{c1} el campo en el cual el flujo magnético penetra primero un superconductor tipo II.

campo crítico superior H_{c2} el campo en el que desaparece la superconductividad en un superconductor de tipo II.

campo magnético H el campo magnético producido por un campo magnético aplicado externo o el campo magnético producido por una corriente que pasa a través de un alambre conductor o una bobina conductora de alambre (solenoide).

capa electrónica grupo de electrones con el mismo número cuántico principal n.

capacitancia medida de la capacidad de un capacitor para almacenar carga eléctrica. La capacitancia se mide en faradios; las unidades utilizadas comúnmente en la circuitería eléctrica son el picofaradio ($1\ \text{pF} = 10^{-12}\ \text{F}$) y el microfaradio ($1\ \mu\text{F} = 10^{-6}\ \text{F}$).

capacitor un dispositivo eléctrico compuesto por placas u hojas conductoras separadas por capas de material dieléctrico el cual es capaz de almacenar carga eléctrica.

catalizador estereoespecífico catalizador que crea principalmente un tipo específico de estereoisómero durante la polimerización. Ejemplo: el catalizador de Ziegler utilizado para polimerizar propileno produciendo principalmente el isómero de polipropileno isotáctico.

catión un ión con una carga positiva.

cátodo el electrodo metálico en una celda electrolítica que acepta electrones.

cedencia (o esfuerzo de fluencia) el esfuerzo al cual una cantidad específica de deformación ocurre en la prueba de tensióningenieril. En los Estados Unidos la cedencia (o esfuerzo de fluencia) se determina para una deformación de 0.2 por ciento.

celda de concentración de iones celda galvánica formada cuando dos pedazos del mismo metal se conectan eléctricamente mediante un electrolito pero están en soluciones de diferentes concentraciones de iones.

celda de concentración de oxígeno celda galvánica formada cuando dos piezas del mismo material se conectan eléctricamente mediante un electrolito pero están en soluciones de diferentes concentraciones de oxígeno.

celda galvánica dos metales disimilares en contacto eléctrico con un electrolito.

celda unitaria unidad convenientemente repetida de una red espacial. Las longitudes axiales y los ángulos axiales son las constantes de la red de esta celda unitaria.

celda unitaria cúbica centrada en el cuerpo (BCC) celda unitaria con un arreglo de empaquetamiento atómico en el que un átomo está en contacto con ocho átomos idénticos ubicados a las esquinas de un cubo imaginario.

celda unitaria cúbica centrada en las caras (FCC) celda unitaria con un arreglo de empaquetamiento atómico en el cual 12 átomos rodean a un átomo central. La secuencia de apilamiento de capas de planos empacados densamente en la estructura cristalina FCC es ABCABC...

celda unitaria de empaquetamiento denso hexagonal (HCP) celda unitaria con un arreglo de empaquetamiento atómico en el cual 12 átomos rodean a un átomo idéntico central. La secuencia de apilamiento de capas de los planos empacados estrechamente en la estructura de cristal HCP es ABABAB...

cementita el compuesto intermetálico Fe_3C; una sustancia dura y quebradiza.

cementita eutectoide (Fe_3C) cementita que se forma durante la descomposición eutectoide de la austenita; la cementita en perlita.

cementita proeutectoide (Fe_3C) cementita que se forma mediante la descomposición de la austenita a temperaturas por encima de la temperatura eutectoide.

cemento portland cemento que consiste principalmente en silicatos de calcio que reaccionan con el agua para formar una masa dura.

cerámicas de vanguardia nueva generación de cerámicas conocidas también como cerámicas de ingeniería o estructurales con resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y propiedades de choque térmico mejoradas.

cerámicas piezoeléctricas materiales que producen un campo eléctrico cuando se someten a una fuerza mecánica (y viceversa).

ciencia de materiales disciplina científica interesada principalmente en la investigación del conocimiento básico acerca de la estructura interna, propiedades y procesamiento de los materiales.

cociente Pilling-Bedworth (P.B.) el cociente entre el volumen de óxido formado y el volumen de metal consumido por oxidación.

colágeno el componente orgánico del hueso.

colocación manual de capas el proceso de colocar (y trabajar) capas sucesivas de material de refuerzo en un molde en forma manual para producir un material compuesto reforzado con fibra.

composición eutéctica la composición de la fase líquida que reacciona para formar dos nuevas fases sólidas a la temperatura eutéctica.

composición hipereutéctica aquella que está a la derecha del punto eutéctico.

composición hipoeutéctica aquella que está a la izquierda del punto eutéctico.

compuesto de moldeo de placa (CMP) compuesto de resina plástica, rellenador y fibra de refuerzo que se usa para fabricar materiales compuestos de plástico reforzados con fibra. Los CMP se suelen fabricar con 25 a 30 por ciento de fibras de casi 1 pulg. (2.54 cm) de largo, de las cuales la fibra de vidrio es la que más se utiliza. Los materiales de CMP suelen preenvejecerse hasta un estado que el propio material pueda soportar y después se cortan al tamaño adecuado y se colocan en un molde de compresión. Luego del prensado caliente, los CMP se curan para producir una parte rígida.

comunicación por fibra óptica método de transmisión de información mediante el uso de luz.

concreto (tipo cemento portland) mezcla de cemento portland, agregado fino, agregado grueso y agua.

concreto ligero concreto en el cual existe una dispersión uniforme de pequeñas burbujas de aire. Cerca de 90 por ciento de las burbujas son de 100 μm o menos.

concreto preesforzado concreto reforzado en el cual los esfuerzos compresivos internos se han introducido para contrarrestar los esfuerzos por tensión que resultan de cargas severas.

concreto pretensado (preesforzado) concreto preesforzado en el cual el concreto se vierte sobre alambres o barras de acero pretensado.

concreto reforzado concreto que contiene alambres o barras de acero para resistir los esfuerzos de tensión.

condiciones de estado estacionario en un sistema de difusión no hay cambio en la concentración de las especies difusoras con el tiempo en diferentes lugares en el sistema.

condiciones de estado no estable en un sistema de difusión la concentración de las especies que se difunden cambian con el tiempo en diferentes lugares en el sistema.

conductividad eléctrica σ_e medida de la facilidad con la cual la corriente eléctrica pasa por un volumen unitario de material. Unidades: $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$. σ_e es la inversa de ρ_e.

conductor eléctrico material con una alta conductividad eléctrica. La plata es un buen conductor y tiene una $\sigma_e = 6.3 \times 10^7\ (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$.

configuración electrónica la distribución de todos los electrones en un átomo de acuerdo con sus orbitales atómicos.

confinamiento térmico región de la curva de enfriamiento para un metal puro donde la temperatura no cambia con el tiempo (meseta) que representa la temperatura de congelamiento.

constante dieléctrica la relación entre la capacitancia de un capacitor utilizando un material entre sus placas comparada con la del capacitor cuando hay un vacío entre ellas.

copolimerización reacción química en la que se forman moléculas de alta masa molecular a partir de dos o más monómeros.

copolímero cadena de polímeros compuesta por dos o más tipos de unidades monoméricas.

corriente eléctrica la velocidad de paso en el tiempo de carga a través de un material; la corriente eléctrica i es el número de coulombios por segundo que pasan por un punto en un material. La unidad del SI para la corriente eléctrica es el ampere (1 A = 1 C/s).

corrosión el deterioro de un material que resulta del ataque químico por parte de su ambiente.

corrosión intergranular corrosión preferencial que ocurre en las fronteras de grano o en regiones adyacentes a las fronteras de grano.

corrosión por esfuerzo ataque corrosivo preferencial de un metal bajo esfuerzo en un ambiente corrosivo.

corrosión por picaduras ataque de corrosión local que resulta de la formación de pequeños ánodos sobre una superficie metálica.

crecimiento de grano la tercera etapa en la cual nuevos granos empiezan a crecer de una manera equiaxial.

cristal un sólido compuesto de átomos, iones o moléculas arreglado en un patrón que se repite en tres dimensiones.

cristalinidad (en polímeros) el empaquetamiento de cadenas moleculares en un arreglo estereorregular con un alto grado de solidez. La cristalinidad en materiales poliméricos nunca es de 100 por ciento y se favorece en materiales poliméricos cuyas cadenas de polímero son simétricas. Ejemplo: el polietileno de alta densidad puede ser 95 por ciento cristalino.

curva de enfriamiento gráficas de temperatura en función del tiempo que se adquieren durante la solidificación de un metal. Proporciona información sobre el cambio de fase cuando se reduce la temperatura.

D

deformación de corte γ desplazamiento de corte a dividido entre la distancia h sobre la cual actúa el corte ($\gamma = a/h$).

deformación elástica si un metal deformado por una fuerza regresa a sus dimensiones originales después de que se elimina la fuerza, se dice que el metal se deformó elásticamente.

deformación ingenieril $\boldsymbol{\epsilon}$ cambio en longitud de una muestra dividida entre la longitud original de la muestra ($\epsilon = \Delta l/l_0$).

degeneración de la soldadura ataque corrosivo en o adyacente a una soldadura como resultado de la acción galvánica que se produce a partir de las diferencias estructurales en la soldadura.

densidad de corriente crítica $\boldsymbol{J_c}$ la densidad de corriente arriba de la cual desaparece la superconductividad.

densidad de corriente eléctrica J la corriente eléctrica por unidad de área. Unidades del SI: amperes/metro^2 (A/m^2).

densidad lineal ρ_l el número de átomos cuyos centros se ubican en una dirección específica en una longitud específica de línea en un cubo unitario.

densidad plana ρ_p el número equivalente de átomos cuyos centros son intersectados por un área seleccionada dividida entre el área seleccionada.

densidad volumétrica ρ_v masa por unidad de volumen; esta cantidad suele expresarse en Mg/m^3 o g/cm^3.

deslizamiento el proceso en el que los átomos se mueven unos sobre otros durante la deformación permanente de un metal.

diagrama de esfuerzo-deformación ingenieril gráfica experimental del esfuerzo ingenieril en función de la deformación ingenieril; σ se dibuja en una gráfica normalmente como el eje y y ϵ como el eje x.

diagrama de fases de equilibrio representación gráfica de las presiones, temperaturas y composiciones para las cuales varias fases son estables en el equilibrio. En la ciencia de materiales los diagramas de fases más comunes incluyen a la temperatura en función de la composición.

diagrama de transformación de enfriamiento continuo (TEC) diagrama de tiempo-temperatura-transformación que indica el tiempo para que una fase se descomponga continuamente en otras fases a diferentes velocidades de enfriamiento.

diagrama de transformación isotérmica (TI) diagrama de transformación tiempo-temperatura que indica el tiempo en que una fase se descompone en otras fases en forma isotérmica a diferentes temperaturas.

diamagnetismo una reacción débil negativa y repulsiva de un material a un campo magnético aplicado; un material diamagnético tiene una pequeña susceptibilidad magnética negativa.

dieléctrico material aislador eléctrico.

difusión intersticial la migración de átomos intersticiales en una retícula de matriz.

difusión sustitucional la migración de átomos del soluto en una red de disolvente en la que los átomos del soluto y el disolvente son casi del mismo tamaño. La presencia de vacantes hace posible la difusión.

difusividad medida de la tasa de difusión en sólidos a una temperatura constante. La difusividad D puede expresarse mediante la ecuación $D = D_0 e^{-Q/RT}$, donde Q es la energía de activación y T es la temperatura en Kelvins. D_0 y R son constantes.

diodo rectificador diodo de unión *pn* que convierte la corriente alterna en corriente directa (ca a cd).

dislocación en una *dislocación de borde* el vector de deslizamiento es perpendicular a la línea de dislocación, mientras que en una *dislocación de tornillo* el vector de deslizamiento es paralelo a la línea de dislocación. Una *dislocación mezclada* tiene componentes tanto de borde como de tornillo.

dislocación una imperfección cristalina en la cual una distorsión de la red se centra alrededor de una línea. La distancia de desplazamiento de los átomos alrededor de la dislocación recibe el nombre de *vector de deslizamiento* o de *Burgers*.

dominio magnético una región en un material ferro o ferrimagnético en el cual se alinean todos los momentos de dipolo magnéticos.

dureza medida de la resistencia de un material a la deformación permanente.

E

ecuación de velocidad de Arrhenius ecuación empírica que describe la velocidad de una reacción como función de la temperatura y una barrera de energía de activación.

efecto Meissner la expulsión del campo magnético mediante un superconductor.

efecto piezoeléctrico efecto electromecánico mediante el cual las fuerzas mecánicas sobre un material ferroeléctrico pueden producir una respuesta eléctrica y las fuerzas eléctricas producir una respuesta mecánica.

elastómero material que a temperatura ambiente se estira bajo un pequeño esfuerzo hasta por lo menos el doble de su longitud y después regresa rápidamente a casi su longitud original al eliminar el esfuerzo.

electrón portador de carga negativa con una carga de 1.60×10^{-19} C.

electrones de valencia electrones en las capas exteriores que están implicados más a menudo en los enlaces.

embobinado de filamento proceso para producir plásticos reforzados con fibra embobinando un refuerzo continuo impregnado previamente con una resina plástica sobre un mandril rotatorio. Cuando se ha aplicado un número suficiente de capas, la forma embobinada se cura y se quita el mandril.

embriones partículas pequeñas de una nueva fase formada por un cambio de fase (por ejemplo, solidificación) que no son de tamaño crítico y que pueden redisolverse.

endurecimiento de solución sólida (endurecimiento) endurecimiento de un metal mediante adiciones de aleaciones que forman soluciones sólidas. Las dislocaciones tienen más dificultad para moverse a través de la red del metal cuando los átomos tienen tamaño y características eléctricas diferentes, como es el caso de las soluciones sólidas.

endurecimiento por deformación (endurecimiento) el endurecimiento de un metal o aleación mediante el trabajo en frío. Durante éste, las dislocaciones se multiplican e interactúan, lo que da lugar a un aumento en la resistencia del metal.

energía de activación la energía adicional que se requiere arriba de la energía promedio para que ocurra una reacción activada térmicamente.

energía de anisotropía magnetocristalina la energía que se requiere durante la magnetización de un material ferromagnético para rotar los dominios magnéticos debido a la anisotropía cristalina. Por ejemplo, la diferencia en la energía de magnetización entre la dirección difícil [111] de magnetización y la dirección fácil [100] en Fe es alrededor de 1.4×10^4 J/m^3.

energía de intercambio la energía asociada con el acoplamiento de los dipolos magnéticos individuales para formar un solo dominio magnético. La energía de intercambio puede ser positiva o negativa.

energía de ionización la energía que se requiere para llevar a un electrón desde su estado base en un átomo hasta el infinito.

energía de la pared de dominio la energía potencial asociada con el desorden de los momentos de dipolo en el volumen de pared entre dominios magnéticos.

energía magnetoestrictiva la energía debida al esfuerzo mecánico causado por magnetoestricción en un material ferromagnético.

energía magnetostática la energía del potencial magnético debido al campo magnético externo que rodea a una muestra de un material ferromagnético.

enlace covalente un enlace primario que resulta de compartir electrones. En la mayoría de los casos el enlace covalente implica el traslape de orbitales medio llenos de dos átomos. Es un enlace direccional. Un ejemplo de un material enlazado en forma covalente es el diamante.

enlace cruzado la formación de enlaces de valencia primarios entre moléculas de cadenas de polímeros. Cuando ocurre el enlace cruzado extensivo como en el caso de resinas termoestables, el enlace cruzado conforma una supermolécula de todos los átomos.

enlace de dipolo permanente un enlace secundario creado por una atracción de moléculas que tienen dipolos permanentes. Esto es, cada molécula tiene centros de carga positivo y negativo separados por una distancia.

enlace iónico enlace primario que resulta de la atracción electroestática de iones cargados opuestamente. Es un enlace no direccional. Un ejemplo de un material enlazado en forma iónica es un cristal de NaCl.

enlace metálico enlace primario que resulta de compartir electrones exteriores no localizados en la forma de una nube de carga electrónica por medio de un agregado de átomos metálicos. Es un enlace no direccional. Un ejemplo de un material enlazado metálicamente es el sodio elemental.

equilibrio se dice que un sistema está en equilibrio si no ocurren cambios microscópicos con el tiempo.

esferoidita mezcla de partículas de cementita (Fe_3C) en una matriz de ferrita α.

esfuerzo cortante τ fuerza de corte S dividida entre el área A sobre la cual actúa la fuerza de corte ($\tau = S/A$).

esfuerzo ingenieril σ fuerza uniaxial promedio dividida entre el área de la sección transversal original ($\sigma = F/A_0$).

esmalte de porcelana recubrimiento de vidrio aplicado a un sustrato metálico.

esmalte de vidrio recubrimiento de vidrio aplicado a un sustrato de vidrio.

estado base el estado cuántico con la energía más baja.

estado superconductor sólido en el estado superconductor que no presenta resistencia eléctrica.

estereoisómero atáctico este isómero tiene grupos de átomos insertados *arreglados al azar* a lo largo de una cadena de polímero de estructura vinílica. Ejemplo: polipropileno atáctico.

estereoisómeros moléculas que tienen la misma composición química pero diferentes arreglos estructurales.

estirado de alambre proceso en el que una provisión de alambre se estira a través de una o más matrices de ahusamiento hasta la sección transversal que se desea.

estructura con núcleo un tipo de microestructura que ocurre durante la rápida solidificación o enfriamiento de no equilibrio de un metal.

estructura cristalina un patrón tridimensional regular de átomos o iones en el espacio.

estructura de espinela inversa compuesto cerámico que tiene la fórmula general $MO \cdot M_2O_3$. Los iones de oxígeno en este compuesto forman una red FCC, con los iones de M^{2+} ocupando los sitios octaédricos y los iones M^{3+} ocupando tanto los sitios octaédricos como los tetraédricos.

estructura de espinela normal compuesto cerámico que tiene la fórmula general $MO \cdot M_2O_3$. Los iones oxígeno en este compuesto forman una red FCC con los iones M^{2+} ocupando sitios intersticiales tetraédricos y los iones M^{3+} ocupando sitios octaédricos.

estructura policristalina estructura cristalina que contiene muchos granos.

eutectoide (acero al medio carbón) acero con 0.8 por ciento de C.

exfoliación un tipo de daño debido a la difusión de hidrógeno atómico dentro de los poros internos en un metal, lo que crea una alta presión interna que produce ruptura.

extrusión acción de forzar a un material plástico ablandado a pasar a través de un orificio, lo que forma un producto continuo. Ejemplo: la tubería plástica es extruida.

extrusión un proceso de formado plástico en el que un material sujeto a alta presión se reduce en su sección transversal cuando es forzado a pasar a través de la abertura de un dado.

F

factor de empaquetamiento atómico (FEA) el volumen de átomos en una celda unitaria seleccionada dividida entre el volumen de la misma.

falla por apilamiento defecto superficial formado debido al apilamiento inadecuado (fuera de lugar) de los planos atómicos.

falla por fatiga falla que ocurre cuando un espécimen se somete a fatiga, se fractura en dos partes, o bien, su rigidez queda reducida de manera significativa.

fase una parte físicamente homogénea y distinta de un sistema de materiales.

fase intermedia fase cuyo intervalo de composición está entre la de las fases terminales.

fase primaria fase sólida que se forma a una temperatura superior a la de una reacción invariante y sigue presente después de que la reacción invariante se completa.

fase proeutéctica una fase que se forma a una temperatura por encima de la temperatura eutéctica.

fase terminal solución sólida de un componente en otro para la cual una frontera del campo de fase es un componente puro.

fatiga el fenómeno que lleva a la fractura bajo esfuerzos repetidos que tiene un valor máximo menor que la resistencia máxima del material.

ferrimagnetismo tipo de magnetismo en el cual los momentos bipolares magnéticos de diferentes iones de un sólido unido iónicamente se alinean mediante un campo magnético de una manera paralela pero con sentidos opuestos de modo que hay un momento magnético neto.

ferrita α eutectoide ferrita α que se forma durante la descomposición eutectoide de la austenita; la ferrita α en perlita.

ferrita α (fase α en el diagrama de fase Fe-Fe_3C) una solución sólida intersticial de carbón en hierro BCC; la solubilidad sólida máxima del carbón en hierro BCC es 0.02 por ciento.

ferrita α proeutectoide ferrita α que se forma mediante la descomposición de la austenita a temperaturas por encima de la temperatura eutectoide.

ferritas blandas compuestos cerámicos con la fórmula general $MO \cdot Fe_2O_3$, donde M es un ión divalente tal como Fe^{2+}, Mn^{2+}, Zn^{2+} o Ni^{2+}. Estos materiales son ferrimagnéticos, así como aisladores, por lo que pueden utilizarse en núcleos de transformadores de alta frecuencia.

ferritas duras materiales cerámicos magnéticos permanentes. La familia más importante de estos materiales tiene la composición básica $MO \cdot Fe_2O_3$, donde M es un ión de bario (Ba) o un ión de estroncio (Sr). Estos materiales tienen estructura hexagonal y son de bajo costo y baja densidad.

ferromagnetismo la creación de una magnetización muy grande en un material cuando se somete a un campo magnético. Después de que el campo magnético aplicado se suprime, el material ferromagnético retiene gran parte de la magnetización.

fibra de carbón (para un material compuesto) fibras de carbón producidas principalmente a partir de poliacrilonitrilo (PAN) o brea que se estira para alinear la estructura de red fibrilar dentro de cada fibra de carbono y que se calienta para eliminar el oxígeno, el nitrógeno e hidrógeno de las fibras de origen o precursoras.

fibras de aramida fibras producidas mediante síntesis química y utilizadas para plásticos reforzados con fibras. Las fibras de aramida tienen una estructura lineal de poliamida aromática (tipo anillo de benzeno) y las produce comercialmente DuPont Co. bajo el nombre comercial de Kevlar.

fibras de vidrio e fibras hechas a partir de vidrio E (eléctrico), que es un vidrio de borosilicato y que es el vidrio que se usa más comúnmente para fibras en los plásticos reforzados con fibra de vidrio.

fibras de vidrio s fibras hechas de vidrio S, que es un vidrio de magnesio-alumina-silicato que se usa para fibras o para plásticos reforzados con fibra de vidrio cuando se requieren fibras de resistencia extra alta.

fluencia deformación dependiente del tiempo de un material cuando se somete a una carga o esfuerzo constante.

fluencia-resistencia a la ruptura, esfuerzo de el esfuerzo que provocará fractura en una prueba de fluencia (esfuerzo-ruptura) en un tiempo dado y en un ambiente específico a una temperatura particular.

fluorescencia absorción de la luz o de otra energía por medio de un material y la emisión subsiguiente de luz dentro de los 10^{-8} s posteriores a la excitación.

fluxoide región microscópica rodeada por supercorrientes circulantes en un superconductor tipo II a campos entre H_{c2} y H_{c1}.

forja un método de procesado primario para dar a los metales formas útiles, en el cual el metal se martilla y se prensa para darle forma.

fosforescencia absorción de luz por un fósforo y su subsiguiente emisión en tiempos mayores a 10^{-8} s.

fotón partícula de radiación con una longitud de onda y frecuencia asociadas. Conocido también como *cuanto* de radiación.

fractura dúctil un modo de fractura caracterizado por la lenta propagación de grietas. Las superficies fracturadas dúctiles de metales suelen ser deslustradas con una apariencia fibrosa.

fractura por fragilización modo de fractura caracterizado por la rápida propagación de grietas. Las superficies de los metales con fractura por fragilización suelen ser brillantes y tienen una apariencia granular.

frontera de ángulo pequeño (inclinación) un arreglo de dislocaciones que forman un desacoplamiento angular dentro de un cristal.

frontera de grano imperfección superficial que separa cristales (granos) de diferentes orientaciones en un agregado policristalino.

frontera de grano de torsión imagen de espejo mal orientada de la estructura cristalina, que se considera un defecto de superficie.

frontera torcida arreglo de dislocaciones de tornillo que crean desacoplamiento en el interior de un cristal.

fuerza coerciva H_c el campo magnético aplicado que se requiere para reducir la inducción magnética de un material ferro magnetizado o ferrimagnético hasta cero.

funcionalidad el número de sitios de enlace activos en un monómero. Si el monómero tiene dos sitios de enlace, se dice que es *bifuncional.*

fundición gris aleaciones de hierro-carbón-silicio con 2.5 a 4.0 por ciento de C y 1.0 a 3.0 por ciento de Si. Las fundiciones grises contienen grandes cantidades de carbón en la forma de escamas de grafito. Son fáciles de maquinar y tienen buena resistencia al desgaste.

fundido por deslizamiento proceso de establecimiento de forma de una cerámica en la cual una suspensión de partículas cerámicas y agua se vierten en un molde poroso y después parte del agua del material fundido se difunde en el molde, dejando una forma sólida en este mismo. A veces el líquido excedente dentro del sólido fundido se saca del molde, de manera que queda un cascarón fundido.

G

grado de polimerización la masa molecular de una cadena de polímero dividida por la masa molecular de su mero.

grados de libertad *F* el número de variables (temperatura, presión y composición) que puede cambiarse *independientemente* sin cambiar la fase o las fases del sistema.

grafito estructura de capas de átomos de carbón enlazadas en forma covalente a otras tres dentro de una capa. Varias capas se unen a través de enlaces secundarios.

grano cristal individual en un agregado policristalino.

granos columnares granos delgados y largos en una estructura policristalina solidificada. Estos granos se forman en el interior de los lingotes metálicos solidificados cuando el flujo de calor es lento y en un eje durante la solidificación.

granos de ejes iguales granos que son aproximadamente iguales en todas las direcciones y tienen orientaciones cristalográficas aleatorias.

guía de ondas ópticas fibra delgada a lo largo de la cual la luz puede propagarse por reflexión total interna y refracción.

H

haz láser haz de radiación óptica monocromática y coherente generada por la emisión estimulada de fotones.

hidrogel material polimérico blando que absorbe agua y se hincha hasta un nivel específico.

hidroxiapatita el constituyente inorgánico del hueso.

hierros fundidos blancos aleaciones de hierro-carbón-silicio con 1.8 a 3.6 por ciento de C y 0.5 a 1.9 por ciento de Si. Los hierros fundidos blancos contienen grandes cantidades de carburo de hierro que los hacen duros y quebradizos.

hierros fundidos dúctiles aleaciones de hierro-carbón-silicio con 3.0 a 4.0 por ciento de C y 1.8 a 2.8 de Si. Los hierros fundidos dúctiles contienen grandes cantidades de carbón en la forma de nódulos (esferas) de grafito en vez de escamas como en el caso del hierro fundido gris. La adición de magnesio (alrededor de 0.05 por ciento) antes de que el hierro fundido líquido se vierta permite la formación de nódulos. Los hierros dúctiles son en general más dúctiles que los hierros fundidos grises.

hierros fundidos maleables aleaciones de hierro-carbón-silicio con 2.0 a 2.6 por ciento de C y 1.1 a 1.6 por ciento de Si. Los hierros fundidos maleables se funden primero como hierros fundidos blancos y luego se tratan térmicamente a cerca de 940°C (1 720°F) y se mantienen alrededor de 3 a 20 h. El carburo de hierro en el hierro blanco se descompone en nódulos de forma irregular o grafito.

hilado colección de manojos de fibras continuas torcidas o no torcidas.

hipereutectoide (acero al medio carbón) acero con 0.8 a 2.0 por ciento de C.

hipoeutectoide (acero al medio carbón) acero con menos de 0.8 por ciento de C.

homogeneización proceso de tratamiento térmico que se da a un metal para eliminar estructuras con gradiente de concentración indeseables.

homopolímero un polímero consistente en sólo un tipo de unidad monomérica.

hueco portador de carga positiva con una carga de 1.60×10^{-19} C.

hueso la materia estructural del cuerpo humano.

hueso cortical (compacto) hueso denso que abarca la estructura exterior.

hueso reticulado (trabecular) el material del hueso que es poroso y blando y que abarca su estructura interna.

I

imperfección de frenkel imperfección puntual en un cristal iónico en la cual una vacante de catión se asocia con un catión intersticial.

imperfección schottky imperfección de punto en un cristal iónico en el cual una vacante de catión se asocia con una vacante de anión.

índice de refracción el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío con la correspondiente al otro medio de interés.

índices de dirección en un cristal cúbico una dirección en una celda unitaria cúbica se indica mediante un vector dibujado desde el origen en un punto en una celda unitaria a través de la superficie de la celda unitaria. Las coordenadas de la posición (x, y y z) del vector donde éste sale de la superficie de la celda unitaria (con las fracciones eliminadas) son los índices de dirección. Estos índices, designados u, v y w se encierran entre corchetes como [uvw]. Los índices negativos se indican mediante una barra sobre el índice.

índices para planos cristalinos cúbicos (índices Miller) los recíprocos de las intersecciones (con fracciones eliminadas) de un plano cristalino con los ejes x, y y z de un cubo unitario, se denominan los índices de Miller de este plano. Se designan con las letras h, k y l para los ejes x, y y z, respectivamente, y se encierran como (hkl). Adviértase que el plano cristalino seleccionado no debe pasar por el origen de los ejes x, y y z.

inducción magnética B la suma del campo aplicado H y el campo magnético M debido a la inserción de un material dado en el campo aplicado. En unidades de SI, $B = \mu_0(H + M)$.

inducción por saturación B_s el valor máximo de la inducción B_s o magnetización M_s de un material ferromagnético.

inducción remanente B_r el valor de B o M en un material ferromagnético después de que H se ha reducido hasta cero.

ingeniería de materiales disciplina de la ingeniería interesada principalmente en el uso de un conocimiento fundamental y aplicado de los materiales de manera que éstos puedan convertirse en los productos necesarios o deseados por la sociedad.

intermetálicos compuestos estequiométricos de elementos metálicos con alta dureza y alta resistencia a la temperatura, aunque quebradizos.

intersticialidad (autointersticial) una imperfección puntual en una red cristalina donde un átomo del mismo tipo que los de la red de la matriz se coloca en un sitio intersticial entre los átomos de la matriz.

inversión de población condición en la cual existen más átomos en un estado de energía superior que en uno de energía más baja. Esta condición es necesaria para la acción tipo láser.

isómero isotáctico este isómero tiene grupos complementarios de átomos, todos en el *mismo lado* de una cadena de polímero vinílico. Ejemplo: polipropileno isotáctico.

isómero sindiotáctico este isómero tiene grupos de átomos insertados que se *alternan regularmente* en posiciones a ambos lados de una cadena de polímero vinílico. Ejemplo: polipropileno sindiotáctico.

L

laminado producto que se hace juntando hojas de un material, usualmente con calor y presión.

laminado multidireccional laminado de plástico reforzado con fibra que se produce ligando entre sí placas reforzadas con fibra con algunas de las direcciones de las fibras continuas de las láminas que están a diferentes ángulos.

laminado unidireccional laminado de plástico reforzado con fibra que se produce pegando capas de placas reforzadas con fibra que en su totalidad tienen fibras continuas en la misma dirección en el laminado.

láser acrónimo (por sus siglas en inglés) de amplificación de luz por emisión estimulada de radiación.

lazo de histéresis la gráfica de B en función de H o de M en función de H trazada por medio de la magnetización y desmagnetización de un material ferro o ferrimagnético.

lignina material polimérico tridimensional de enlace cruzado muy complejo que se forma a partir de unidades fenólicas.

línea de separación línea de trabajo horizontal dibujada a una temperatura particular entre dos fronteras de fase (en un diagrama de fases binario) que se usa para aplicar la regla de la palanca. Se dibujan líneas verticales desde la intersección de la línea de separación con las fronteras de fase para la línea de la composición horizontal. También se dibuja una línea vertical desde la línea de separación hacia la línea horizontal en el punto de intersección de la línea de separación con la aleación de interés para usarla como la regla de la palanca.

liquidus la temperatura a la cual el líquido empieza a solidificarse bajo condiciones de equilibrio.

lixiviación selectiva la remoción preferencial de un elemento de una aleación sólida mediante el proceso de corrosión.

lumen la cavidad en el centro de una celda de madera.

luminiscencia absorción de luz u otra energía por un material y la emisión subsiguiente de luz de longitud de onda más larga.

M

M_f la temperatura a la cual la austenita en el acero termina transformándose en martensita.

M_s la temperatura a la cual la austenita en el acero empieza a transformarse en martensita.

maclado de deformación un proceso de deformación plástica que ocurre en algunos metales y bajo ciertas condiciones. En este proceso un gran grupo de átomos se desplaza en conjunto para formar una región de una retícula cristalina metálica que es una imagen de espejo de una región similar a lo largo de un plano de maclado.

madera material compuesto natural consistente principalmente en un arreglo complejo de fibras de celulosa dentro de una matriz de material polimérico conformada principalmente por lignina.

madera de corazón la parte más interna del tallo del árbol que en el árbol vivo contiene sólo células muertas.

magnetización M medida del aumento en el flujo magnético debido a la inserción de un material dado en un campo magnético de intensidad H. En unidades del SI la magnetización es igual a la permeabilidad del vacío (μ_0) veces la magnetización o $\mu_0 M$. ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-4}$ T · m/A.)

magnetoestricción el cambio en la longitud de un material ferromagnético en la dirección de magnetización debido a un campo magnético aplicado.

magnetón de Bohr el momento magnético producido en un material ferro o ferrimagnético por un electrón no apareado sin interacción con algún otro; el magnetón de Bohr es una unidad fundamental. Un magnetón de Bohr $= 9.27 \times 10^{-24}$ A · m^2.

martemperizado (martemplado) un proceso de templado mediante el cual un acero en la condición austenítica se templa en caliente en un baño líquido (sal) por arriba de la temperatura M_s, y se deja así por un in-

tervalo de tiempo suficientemente corto para evitar que la austenita se transforme, y después se deja enfriar lentamente hasta la temperatura ambiente. Después de este tratamiento el acero estará en la condición martensítica, pero el templado interrumpido permite que se liberen los esfuerzos en el acero.

martensita solución sólida intersticial supersaturada de carbón en hierro tetragonal centrado en el cuerpo.

material compuesto sistema de materiales compuestos por una mezcla o combinación de dos o más micro o macro constituyentes que difieren en forma y composición química y que son en esencia insolubles entre sí.

material de relleno una sustancia inerte de bajo costo que se agrega a los plásticos para hacerlos menos costosos. Los materiales de relleno también mejoran algunas propiedades físicas como la resistencia a la tensión, la resistencia al impacto, la dureza, la resistencia al desgaste, etcétera.

material ferroeléctrico material que puede polarizarse cuando se aplica un campo eléctrico.

material ferromagnético aquel que es capaz de magnetizarse en alto grado. El hierro elemental, el cobalto y el níquel son materiales ferromagnéticos.

material magnético blando material magnético con una alta permeabilidad y baja fuerza coerciva.

material magnético duro material magnético con una alta fuerza coerciva y una alta inducción por saturación.

material refractario (cerámica) material que puede soportar la acción de un ambiente caliente.

materiales sustancias a partir de las cuales algo se compone o fabrica. El término *materiales de ingeniería* algunas veces se utiliza para referirse específicamente a materiales que se utilizan para crear productos para aplicaciones técnicas. Sin embargo, no hay una línea de demarcación clara entre los dos términos por lo que se emplean indistintamente.

materiales cerámicos materiales consistentes en compuestos de metales y no metales. Los materiales cerámicos suelen ser duros y quebradizos. Ejemplos son los productos de arcilla, vidrio y de óxido de aluminio puro que se han compactado y densificado.

materiales cerámicos materiales no metálicos inorgánicos que están compuestos por elementos metálicos y no metálicos ligados entre sí fundamentalmente por enlaces iónicos y/o covalentes.

materiales compuestos materiales con mezclas de dos o más materiales. Por ejemplo, el material resultante al reforzar un poliéster o matriz epóxica.

materiales electrónicos materiales utilizados en electrónica, especialmente microelectrónica. Son ejemplos el silicio y el arsenuiro de galio.

materiales inteligentes materiales con la capacidad de sentir y responder a estímulos externos.

materiales metálicos (metales y aleaciones metálicas) materiales inorgánicos que se caracterizan por altas conductividades térmica y eléctrica. Son ejemplos el hierro, el acero, el aluminio y el cobre.

materiales poliméricos materiales consistentes en cadenas o redes moleculares largas de elementos de bajo peso como el carbón, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. La mayoría de los materiales poliméricos tienen conductividades eléctricas bajas. Son ejemplos el polietileno y el policloruro de vinilo (PVC).

mecánica cuántica rama de la física en la que los sistemas que se investigan pueden tener sólo valores de energía permitida discretos que están separados por regiones prohibidas.

mero unidad repetida en una molécula de polímero en cadena.

metal amorfo metales con una estructura no cristalina también denominados metales vidriosos. Estas aleaciones tienen un alto umbral de deformación elástica.

metales nanocristalinos metales con tamaño de grano más pequeño que 100 nm.

metales y aleaciones ferrosos metales y aleaciones que contienen un gran porcentaje de hierro tales como los aceros y los hierros fundidos.

metales y aleaciones no ferrosos metales y aleaciones que no contienen hierro, o si lo contienen, sólo es en un porcentaje relativamente pequeño. Ejemplos de materiales no ferrosos son el aluminio, el cobre, el zinc, el titanio y el níquel.

mezclas mezcla de dos o mas polímeros, llamadas también aleaciones de polímeros.

mezclas de asfaltos mezclas de asfaltos y agregados que se usan principalmente para pavimentar caminos.

microfibrillas estructuras elementales que contienen celulosa y que forman las paredes de las células de madera.

micromáquina MEM que efectúa una función o tarea específica.

microscopio de sonda de barrido (MSB) técnicas de microscopia tales como STM y AFM que permiten el mapeo de la superficie de un material al nivel atómico.

microscopio electrónico de barrido (MEB) instrumento utilizado para examinar la superficie de un material a amplificaciones muy altas mediante la incidencia de electrones.

microscopio electrónico de transmisión (MET) instrumento utilizado para estudiar estructuras de defectos internas con base en el paso de electrones a través de películas delgadas de materiales.

microscopio electrónico de transmisión de alta resolución (METAR) técnica basada en el MET pero con una resolución bastante más alta utilizando muestras significativamente delgadas.

modelo de bandas de energía en este modelo las energías de los electrones de valencia de enlace de los átomos de un sólido forman una banda de energía. Por ejemplo, los electrones de valencia 3*s* en un pedazo de sodio forman una banda de energía 3*s*. Puesto que sólo hay un electrón 3*s* (el orbital 3*s* puede contener dos electrones), la banda de energía 3*s* en el metal de sodio está medio llena.

modificadores de red un óxido que rompe la red de silicio cuando se agrega al vidrio de silicio. Los modificadores reducen la viscosidad del vidrio de sílice y promueven la cristalización. Son ejemplos Na_2O, K_2O, CaO y MgO.

módulo de elasticidad *E* esfuerzo dividido entre la deformación σ/ϵ en la región elástica de un diagrama de ingeniería de esfuerzo-deformación para un metal ($E = \sigma/\epsilon$).

módulo específico de tensión el módulo de tensión de un material dividido entre su densidad.

moldeo con bolsa de vacío proceso de moldeo de una parte de plástico reforzado con fibra en la que las placas de material flexible transparente se colocan sobre una parte laminada que no se ha curado. Las placas y la parte se sellan, y después se aplica un vacío entre las placas de la cubierta y la parte laminada de manera que el aire atrapado se expulsa mecánicamente del laminado. Luego se cura la parte con la bolsa de vacío.

moldeo por compresión proceso de moldeo termoestable en el que un compuesto moldeable (que usualmente se calienta) se coloca primero en una cavidad de moldeo. Luego el molde se cierra y se aplican calor y presión hasta que se cura el material.

moldeo por transferencia proceso de moldeo para termofijos en el que el compuesto moldeable se ablanda primero mediante calor en una cámara de transferencia y luego se fuerza a alta presión hacia una o más cavidades de moldeo para el curado final.

moldeo por inyección proceso de moldeo mediante el cual un material plástico ablandado mediante calor se fuerza por medio de un cilindro con accionamiento de tornillo en una cavidad de molde relativamente fría que le da al plástico la forma deseada.

moldeo por soplado método para fabricar plásticos en el que un tubo hueco (parisón) se fuerza en la forma de una cavidad moldeada mediante presión de aire interna.

monómero compuesto molecular simple que puede enlazarse en forma covalente para formar cadenas moleculares largas (polímeros). Ejemplo: etileno.

motivo grupo de átomos que se organizan (o son bases) en relación unos de otros y que se asocian con puntos de la red correspondientes.

N

nanomateriales materiales con una escala de longitud característica más pequeña que 100 nm.

niveles de aceptor en la teoría de bandas, los niveles de energía local cercanos a la banda de valencia.

niveles de donador en la teoría de bandas, niveles de energía locales cerca de la banda de conducción.

nucleación heterogénea (en referencia a la solidificación de metales) la formación de regiones muy pequeñas (denominadas *núcleos*) de una nueva fase sólida en las intracaras de impurezas sólidas. Estas impurezas reducen el tamaño crítico a una temperatura particular de un núcleo sólido estable.

nucleación homogénea (en cuanto a la solidificación de metales) la formación de regiones muy pequeñas de una nueva fase sólida (llamada *núcleo*) en un metal puro que puede crecer hasta que se termina la solidificación. El metal puro homogéneo proporciona por sí mismo los átomos que conforman los núcleos.

núcleo de ión positivo átomo sin sus electrones de valencia.

núcleos partículas pequeñas de una nueva fase formada por un cambio de fase (por ejemplo, solidificación) que puede crecer hasta que se completa el cambio de fase.

número atómico el número de protones en el núcleo de un átomo de un elemento.

número de Avogadro 6.023×10^{23} átomos/mol; el número de átomos en un gramo-mol o mol relativo de un elemento.

número de componentes de un diagrama de fases el número de elementos o compuestos que conforman el sistema del diagrama de fases. Por ejemplo, el sistema Fe-Fe_3C es de dos componentes; el sistema Fe-Ni también es de dos componentes.

número de coordinación (NC) el número de vecinos equidistantes más próximos a un átomo o ión en una celda unitaria de una estructura cristalina. Por ejemplo, en NaCl, CN = 6 puesto que 6 aniones de Cl^- equidistantes rodean al catión central Na^+.

número de tamaño de grano número nominal (promedio) de granos por unidad de área a una amplificación particular.

números cuánticos el conjunto de cuatro números necesarios para caracterizar a cada electrón en un átomo. Éstos son los números cuánticos principales n, el número cuántico orbital l, el número cuántico magnético m_l y el número cuántico de espín (giro) m_s.

O

orbital atómico la región en el espacio alrededor del núcleo de un átomo en el cual es más probable que se encuentre un electrón que tiene un conjunto dado de números cuánticos. Un orbital atómico se asocia también con cierto nivel de energía.

orbital híbrido orbital atómico obtenido cuando dos o más orbitales no equivalentes de un átomo se combinan. El proceso del rearreglo de los orbitales se denomina *hibridación*.

óxido para formar vidrio un óxido que forma un vidrio con facilidad; también un óxido que contribuye a formar la red de vidrio de sílice cuando se añade a ella, tal como B_2O_3.

óxidos intermedios óxido que puede actuar como un formador de vidrio o como un modificador de vidrio, dependiendo de la composición de este último. Ejemplo, Al_2O_3.

P

paramagnetismo reacción atractiva, positiva y débil de un material a un campo magnético aplicado; el material paramagnético tiene una pequeña susceptibilidad magnética positiva.

parámetro de Larsen Miller parámetro de tiempo-temperatura utilizado para predecir ruptura por esfuerzo debido a la fluencia lenta.

parénquima celdas de almacenamiento de nutrientes de los árboles que son cortas y con paredes relativamente delgadas.

pasivación la formación de una película de átomos o moléculas sobre la superficie de un ánodo de manera que la corrosión se retarda o interrumpe.

pérdida de energía por histéresis el trabajo o energía que se pierde al seguir un lazo de histéresis *B-H*. La mayoría de la energía que se pierde se gasta en mover las fronteras del dominio durante la magnetización.

pérdidas de energía por corrientes parásitas pérdidas de energía en materiales magnéticos mientras se usan campos alternos. Las pérdidas se deben a corrientes inducidas en el material.

perlita mezcla de las fases de ferrita α y cementita (Fe_3C) en placas paralelas (estructura laminar) producida por la descomposición eutectoide de la austenita.

permeabilidad magnética μ el cociente entre la inducción magnética B y el campo magnético aplicado H en un material, $\mu = B/H$.

permeabilidad relativa μ_r el cociente entre la permeabilidad de un material y la permeabilidad del vacío: $\mu_r = \mu/\mu_0$.

plástico termofijo (termofijo) material plástico que se ha sometido a una reacción química mediante la acción de calor, catalizadores, etc., y que lo lleva a una estructura macromolecular de red de enlace cruzado. Los plásticos termofijos no pueden volverse a fundir y ni son reprocesables puesto que cuando se calientan se degradan y descomponen. Plásticos termoestables típicos son las resinas fenólicas, poliésteres no saturados y las resinas epóxicas.

plásticos reforzados con fibra materiales compuestos consistentes en una mezcla de una matriz de un material plástico tal como un poliéster o resina epóxica reforzada mediante fibras de alta resistencia como el vidrio, carbón o la aramida. Las fibras proporcionan la alta resistencia y rigidez, y la matriz de plástico une a las fibras en conjunto y las soporta.

plastificantes agentes químicos agregados a compuestos plásticos para mejorar el flujo y el proceso y reducir la fragilidad. Ejemplo: policloruro de vinilo plastificado.

pliegue de laminado (lámina) capa de un laminado multicapa.

polarización la alineación de pequeños dipolos eléctricos en un material dieléctrico para producir un momento de dipolo neto en el material.

polarización voltaje aplicado a dos electrodos de un dispositivo electrónico.

polarización catódica la desaceleración o interrupción de las reacciones catódicas en un cátodo de una celda electroquímica debido a 1) un ritmo bajo en la secuencia de la reacción en la intracara metal-electrolito (*polarización de activación*) o 2) a una escasez del reactivo o acumulación de productos de reacción en la intracara metal-electrolito (*polarización por concentración*).

polarización directa polarización aplicada a una unión *pn* en la dirección de conducción; en una unión *pn* bajo polarización directa, los electrones y huecos de los portadores mayoritarios fluyen hacia la unión de manera que circula una gran corriente.

polarización inversa polarización aplicada a una unión *pn* de manera que fluye una pequeña corriente; en una unión *pn* bajo polarización inversa, los electrones y los huecos de los portadores mayoritarios fluyen alejándose de la unión.

poliisopreno *cis* 1,4 el isómero de poliisopreno 1,4 que tiene un grupo metilo e hidrógeno en el mismo lado del doble enlace central de su mero. El hule natural está compuesto principalmente por este isómero.

poliisopreno *trans* 1,4 el isómero de poliisopreno 1,4 que tienen el grupo metilo y el hidrógeno en lados opuestos del doble enlace central de su mero.

polimerización la reacción química en la cual se forman moléculas de elevada masa molecular a partir de monómeros.

polimerización en cadena el mecanismo de polimerización por medio del cual cada molécula del polímero aumenta el tamaño a una con rapidez una vez que se ha iniciado el crecimiento. Este tipo de reacción ocurre en tres etapas: 1) inicio de la cadena, 2) propagación de la cadena y 3) terminación de la cadena. El nombre implica una reacción en cadena y suele iniciarse mediante alguna fuente externa. Ejemplo: la polimerización en cadena del etileno para producir polietileno.

polimerización en masa la polimerización directa de un monómero líquido en un polímero en un sistema de reacciones en las que el polímero permanece disuelto en su propio monómero.

polimerización en solución en este proceso se usa un disolvente que disuelve al monómero, al polímero y al iniciador de la polimerización. La dilución del monómero con el disolvente reduce la velocidad de polimerización, y el calor liberado por la reacción de polimerización lo absorbe el disolvente.

polimerización en suspensión en este proceso se usa agua como el medio de reacción, y el monómero se dispersa en lugar de disolverse en el medio. Los productos de polímero se obtienen en la forma de pequeñas esferas que se filtran, lavan y secan en la forma de polvos para moldeo.

polimerización por pasos el mecanismo de polimerización por medio del cual el crecimiento de la molécula del polímero procede por medio de una reacción intermolecular paso a paso. Sólo está implicado un tipo de reacción. Las unidades de monómero pueden reaccionar entre sí o con cualquier tamaño de molécula de polímero. El grupo activo en el extremo de un monómero se supone que tiene la misma reactividad sin importar la longitud del polímero. A menudo se produce un subproducto, como el agua, en el proceso de polimerización. Ejemplo: la polimerización del nylon 6,6 a partir de ácido adípico y hexametilen diamina.

polímero biodegradable un tipo de polímero que se absorbe en el cuerpo humano después de que cumple su propósito; por ejemplo, suturas absorbibles.

polímero hidrofílico polímeros que absorben agua; similar al agua.

polimorfismo (en cuanto a metales) la capacidad de un metal de presentar una o más estructuras cristalinas. Por ejemplo, el hierro puede tener una estructura cristalina BCC o FCC, dependiendo de la temperatura.

portadores mayoritarios el tipo de portador de carga más predominante en un semiconductor; los portadores mayoritarios en un semiconductor tipo *n* son electrones de conducción, y en un semiconductor tipo *p* son huecos de conducción.

portadores minoritarios el tipo de portador de carga en la concentración más baja en un semiconductor. Los portadores minoritarios en los semiconductores tipo *n* son huecos, y los semiconductores tipo *p* son electrones.

prensado isostático la compactación y formación simultánea de un polvo cerámico (y aglomerante) mediante presión aplicada uniformemente en todas las direcciones.

prensado seco la compactación y formación uniaxial simultáneas de partículas granulares cerámicas (y aglomerantes) en una matriz.

prepreg tela o estera impregnada de resina plástica de fácil moldeo que puede contener fibras de refuerzo. La resina se cura parcialmente hasta una etapa "B" y se suministra a un fabricante que utiliza el material como las capas de un producto laminado. Después de que las capas se han depositado para producir una forma final, se pegan, usualmente con calor y presión, mediante el curado de la lámina.

primera ley de Fick de la difusión en sólidos el flujo de una especie que se difunde es proporcional al gradiente de concentración a temperatura constante.

principio de exclusión de Pauli el enunciado de que ningún par de electrones puede tener los mismos cuatro números cuánticos.

principio de incertidumbre de Heisenberg el enunciado de que es imposible determinar con exactitud al mismo tiempo la posición y el momento de una pequeña partícula como un electrón.

producto de energía máximo $(BH)_{máx}$ el valor máximo de B por H en la curva de desmagnetización de un material magnético duro. El valor de $(BH)_{máx}$ tiene unidades del SI de J/m^3.

protección anódica la protección de un metal que forma una película pasivada mediante la aplicación de una corriente anódica alimentada externamente.

protección catódica la protección de un metal conectándolo a un ánodo de sacrificio o suministrándole un voltaje de cd para hacerlo un cátodo.

protección contra esfuerzos condición en la que el implante aplicado se lleva una parte importante de la carga que soporta un hueso fracturado. Tiene efectos colaterales negativos.

prueba de templabilidad de Jominy prueba en la cual una barra de 1 pulg (2.54 cm) de diámetro y de 4 pulg (10.2 cm) de largo se austenitiza y luego se templa con agua en un extremo. Se mide la dureza a lo largo del lado de la barra hacia arriba hasta cerca de 2.5 pulg (6.35 cm) desde el extremo templado. Se realiza una gráfica denominada la *curva de templabilidad de Jominy* trazando una gráfica de la dureza de la barra contra la distancia desde el extremo templado.

puente de hidrógeno tipo especial de atracción de dipolo permanente intermolecular que ocurre entre un átomo de hidrógeno enlazado a un elemento altamente electronegativo (F, O, N o Cl) y otro átomo de un elemento altamente electronegativo.

pultrusión proceso para producir continuamente una parte de plástico reforzada con fibra de sección transversal constante. La parte pultruida se elabora estirando una colección de fibras sumergidas en resina a través de una matriz calentada.

punto de ablandamiento a esta temperatura el vidrio fluye a una velocidad considerable.

punto de deformación a esta temperatura el vidrio es rígido.

punto de recocido a esta temperatura pueden relajarse los esfuerzos en el vidrio

punto de red punto en un arreglo arbitrario en el cual todos los puntos tienen entornos idénticos.

punto de trabajo a esta temperatura el vidrio puede trabajarse con facilidad.

punto eutéctico el punto determinado por la composición y la temperatura eutécticas.

puntos de referencia del vidrio (temperaturas)

temperatura de transición vítrea el centro del intervalo de temperatura donde un termoplástico calentado luego del enfriamiento cambia de un estado elástico y correoso hasta el del vidrio quebradizo

temperatura de transición vítrea el centro del intervalo de temperatura en la cual un sólido no cristalino cambia de vidrio quebradizo a viscoso.

R

radio crítico r^* del núcleo el radio mínimo que una partícula de una nueva fase formada por nucleación debe tener para convertirse en un núcleo estable.

radio de madera un agregado en forma de tira de celdas que se extienden en forma radial en el tallo del árbol. El tejido del radio está compuesto fundamentalmente de celdas de parénquima para el almacenamiento de nutrientes.

reacción de hidratación reacción del agua con otro compuesto. La reacción del agua con cemento portland es una reacción de hidratación.

reacción eutéctica (en un diagrama de fases binario) transformación de fase en la cual toda la fase líquida se transforma isotérmicamente, mediante enfriamiento, en dos fases sólidas.

reacción monotéctica (en un diagrama de fases binario) transformación de fase en la cual, luego del enfriamiento, una fase líquida se transforma en una fase sólida y en una nueva fase líquida (de composición diferente a la de la primera fase líquida).

reacción peritéctica (en un diagrama de fases binario) una transformación de fases en la cual, después del enfriamiento, una fase líquida se combina con una fase sólida para producir una nueva fase sólida.

reacciones invariantes aquellas reacciones en las que las fases reaccionantes tienen temperatura y composición fijas. El grado de libertad, F_1, es cero en estos puntos de reacción.

reacciones invariantes transformaciones de fase de equilibrio que implican cero grados de libertad.

recocido proceso de tratamiento térmico aplicado a un metal trabajado en frío para ablandarlo.

recocido tratamiento térmico que se da a un metal para ablandarlo.

recocido (de un material cerámico) calentamiento de un material cerámico hasta una temperatura suficientemente alta para causar la formación de un enlace químico entre las partículas.

recocido magnético el tratamiento térmico de un material magnético en un campo magnético que alinea parte de la aleación en la dirección del campo aplicado. Por ejemplo, el precipitado α' en la aleación de alnico 5 se estira y se alinea mediante este tipo de tratamiento térmico.

recristalización la segunda etapa del proceso de recocido en la cual nuevos granos empiezan a crecer y la densidad de las dislocaciones disminuye de manera significativa.

recuperación la primera etapa en el proceso de recocido que produce la relajación de los esfuerzos residuales y la formación de configuración de dislocación de baja energía.

red espacial arreglo tridimensional de puntos, cada uno de los cuales tiene entornos idénticos.

reducción en frío porcentual

$$\text{porcentaje de reducción en frío} = \frac{\text{cambio en el área de la sección transversal}}{\text{área de la sección transversal original}} \times 100\%$$

regla de la palanca los porcentajes de peso de las fases en cualesquiera dos regiones de fase de un diagrama binario de fases pueden calcularse utilizando esta regla si prevalecen las condiciones de equilibrio.

regla de las fases de Gibbs el enunciado de que en equilibrio el número de fases más los grados de libertad es igual al número de componentes más 2. $P + F = C + 2$. En la forma condensada con presión $\approx$ 1 atm, $P + F = C + 1$.

relación de Hall-Petch ecuación empírica que relaciona la resistencia de un metal con su tamaño de grano.

relación de radio crítico (mínimo) la relación entre el catión central y los aniones de los alrededores cuando la totalidad de estos últimos apenas se tocan entre sí y al catión central.

relación de radios (para un sólido iónico) la relación entre el radio del catión central y el de los aniones de los alrededores.

remodelación de huesos la capacidad de un hueso para alterar su tamaño y estructura con base en esfuerzos externos.

resistencia dieléctrica el voltaje por longitud unitaria (campo eléctrico) al cual un material dieléctrico permite la conducción, esto es, el campo eléctrico máximo que un dieléctrico puede soportar sin ruptura eléctrica.

resistencia eléctrica *R* la medida de la dificultad del paso de la corriente eléctrica a través de un volumen de material. La resistencia aumenta con la longitud y crece con la reducción del área de la sección transversal del material a través del cual pasa la corriente. Unidad del SI: ohm (Ω).

resistencia específica a la tensión la resistencia a la tensión de un material dividida entre su densidad.

resistencia última a la tensión (RUT) el esfuerzo máximo en el diagrama de ingeniería de esfuerzo-deformación.

resistividad eléctrica ρ_e medida de la dificultad del paso de corriente eléctrica a través de un volumen *unitario* de un material. Para un volumen de material $\rho_e = RA/l$, donde R = resistencia del material, Ω; l = su longitud, m; A = su área de sección transversal, m^2. En unidades del SI, ρ_e = ohm-metros ($\Omega \cdot$ m).

resquebrajamiento por hidrógeno pérdida de ductilidad en un metal debido a la interacción del elemento aleante en el metal con hidrógeno atómico o molecular.

S

segunda ley de Fick de la difusión en sólidos la velocidad de cambio de la composición es igual a la difusividad multiplicada por la velocidad de cambio del gradiente de concentración a temperatura constante.

semiconductor material cuya conductividad eléctrica está aproximadamente a la mitad entre los valores para buenos conductores y aisladores. Por ejemplo, el silicio puro es un elemento semiconductor y tiene $\sigma_e = 4.3 \times 10^{-4}\ (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ a 300 K.

semiconductor extrínseco tipo *n* material semiconductor que se ha tratado con un elemento tipo *n* (por ejemplo, silicio tratado con fósforo). Las impurezas tipo *n* donan electrones que tienen energías cercanas a la banda de conducción.

semiconductor extrínseco tipo *p* material semiconductor que se ha tratado con un elemento tipo *p* (por ejemplo, silicio tratado con aluminio). Las impurezas tipo *p* proporcionan huecos electrónicos cercanos al nivel de energía superior de la banda de valencia.

semiconductor intrínseco material semiconductor que es esencialmente puro y para el cual la brecha de energía es suficientemente pequeña (alrededor de 1 eV) para ser superada por la excitación térmica; los portadores de corriente son los electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia.

semicristalino materiales con regiones de estructura cristalina dispersas en la región amorfa circundante; por ejemplo, algunos polímeros.

serie galvánica (agua de mar) arreglo de elementos metálicos de acuerdo con sus potenciales electroquímicos en agua de mar con referencia a un electrodo estándar.

series de fuerzas electromotrices arreglo de elementos metálicos de acuerdo con sus potenciales electroquímicos estándar.

sinterización (de un material cerámico) el proceso en el que partículas finas de un material cerámico se unen químicamente al someterlas a una temperatura suficientemente alta para que ocurra la difusión atómica entre las partículas.

sistema porción del universo que ha sido aislado de manera que es posible estudiar sus propiedades.

sistema de deslizamiento combinación de un plano de deslizamiento y una dirección de deslizamiento.

sistema isomorfo diagrama de fases en el cual sólo hay una fase sólida, esto es, sólo hay una estructura de estado sólido.

sistemas microelectromecánicos (SMEM) cualquier dispositivo miniaturizado que efectúa la función de sensado y/o actuación.

sitio intersticial octaédrico el espacio encerrado cuando los núcleos de seis átomos (iones) circundantes forman un octaedro.

sitio intersticial tetraédrico el espacio encerrado cuando los núcleos de cuatro átomos (iones) de los alrededores forman un tetraedro.

solidus la temperatura durante la solidificación de una aleación a la cual lo último de la fase líquida se solidifica.

solución sólida una aleación de dos o más metales o un metal(es) y un no metal(es) que tiene una mezcla atómica de una fase.

solución sólida intersticial solución sólida formada en la que los átomos del soluto pueden entrar en los intersticios o huecos en la retícula de los átomos del disolvente.

solución sólida sustitucional solución sólida en la que los átomos del soluto de un elemento pueden reemplazar a aquellos átomos del disolvente del otro elemento. Por ejemplo, en una solución sólida de Cu-Ni los átomos de cobre pueden sustituir a los átomos de níquel en la retícula cristalina de la solución sólida.

solvus una frontera de fase debajo de la frontera de fase líquida isotérmica + sólida proeutéctica y entre la solución sólida terminal y las regiones de dos fases en un diagrama de fase eutéctica binaria.

superaleaciones aleaciones metálicas con desempeño mejorado a temperaturas elevadas y altos niveles de esfuerzos.

superconductor tipo I aquel que exhibe repulsión completa al flujo magnético entre los estados normal y superconductor.

superconductor tipo II aquel en el cual el flujo magnético penetra gradualmente entre los estados normal y superconductor.

superplasticidad la capacidad de algunos metales a deformarse plásticamente en 1 000-2 000% a altas temperaturas y bajas velocidades de carga.

susceptibilidad magnética X_m el cociente entre M (magnetización) y H (campo magnético aplicado); $\chi_m = M/H$.

T

temperatura crítica T_c la temperatura debajo de la cual un sólido no muestra resistencia eléctrica.

temperatura de curie la temperatura a la cual un material ferromagnético cuando se calienta pierde por completo su ferromagnetismo y se vuelve paramagnético.

temperatura de curie (de un material ferroeléctrico) la temperatura a la cual un material ferroeléctrico en enfriamiento experimenta un cambio de estructura cristalina que produce polarización espontánea en el material. Por ejemplo, la temperatura de curie de $BaTiO_3$ es 120°C.

temperatura eutéctica la temperatura a la cual ocurre una reacción eutéctica.

templabilidad la facilidad de formar martensita en un acero luego de templarlo a partir de la condición austenítica. Un acero altamente templable es aquel que forma martensita a través del mismo en secciones gruesas. La templabilidad no debe confundirse con la dureza. La dureza es la resistencia de un material a la penetración. La templabilidad de un acero es principalmente una función de su composición y tamaño de grano.

templado (de un acero) el proceso de recalentar un acero para aumentar su tenacidad y ductilidad. En este proceso la martensita se transforma en martensita templada.

termistor dispositivo semiconductor cerámico que cambia en resistividad cuando la temperatura cambia y se usa para medir y controlar la temperatura.

termoplástico (nombre) material plástico que requiere calor para hacerlo formable (plástico) y después del enfriamiento, retiene su forma. Los termoplásticos están compuestos por polímeros en cadena con los enlaces entre las cadenas de tipo de dipolo secundario permanente. Los termoplásticos pueden ablandarse repetidamente cuando se calientan y endurecerse cuando se enfrían. Termoplásticos típicos son los polietilenos, vinílicos, acrílicos, celulósicos y nailons.

trabajo en caliente de metales deformación permanente de metales y aleaciones arriba de la temperatura a la cual se produce continuamente una microestructura sin deformación (temperatura de recristalización).

trabajo en frío de metales deformación permanente de los metales y aleaciones debajo de la temperatura a la cual se produce continuamente una microestructura sin deformación (temperatura de recristalización). El trabajo en frío ocasiona que el metal se vuelva resistente a la deformación.

transductor dispositivo que actúa mediante potencia de una fuente y transmite potencia en otra forma a un segundo sistema. Por ejemplo, un transductor puede convertir la energía sonora de entrada en una respuesta eléctrica de salida.

transición de dúctil a quebradizo (TDQ) ductilidad y resistencia a la fractura reducidas que se observan en un material cuando la temperatura es baja.

transistor de unión bipolar dispositivo semiconductor de dos uniones y tres elementos. Los tres elementos básicos de transistor son el emisor, la base y el colector. Los transistores de unión bipolar pueden ser de tipos npn o pnp. La unión emisor-base se polariza directamente y la unión colector-base se polariza inversamente de manera que el transistor puede actuar como un dispositivo de amplificación de corriente.

traqueidas (longitudinales) la célula predominante que se encuentra en las maderas blandas; las traqueidas tienen su función en la conducción y el soporte.

U

unidad de masa atómica (u) unidad de masa basada en la masa de exactamente 12 de las que corresponden a $^{12}_{6}C$.

unión pn unión o frontera abrupta entre regiones tipo p y tipo n dentro de un solo cristal de un material semiconductor.

V

vacante imperfección de punto en una red cristalina donde falta un átomo en un sitio atómico.

vaso de madera estructura tubular formada por la unión de elementos de células más pequeños en una fila longitudinal.

velocidad de fluencia la pendiente de la curva fluencia-tiempo en un tiempo dado.

velocidad de crecimiento de fisuras por fatiga *da/dN* la velocidad de extensión del crecimiento de grietas causada por carga de fatiga de amplitud constante.

vida por fatiga el número de ciclos de esfuerzo o deformación de un carácter específico que una muestra soporta antes de la falla.

vidriado un recubrimiento de vidrio aplicado a un sustrato cerámico.

vidrio material cerámico que se produce a partir de materiales inorgánicos a altas temperaturas y que se distingue de otras cerámicas por el hecho que sus constituyentes se calientan hasta la fusión y luego se enfrían hasta la condición rígida sin que haya cristalización.

vidrio flotado vidrio plano que se produce a partir de una tira de vidrio fundido frío que se lleva al estado vítreo-frágil mientras flota en la parte superior de un baño plano de estaño fundido y bajo una atmósfera reductora.

vidrio metálico metales con una estructura atómica amorfa.

vidrio químicamente templado vidrio al que se le ha dado un tratamiento químico para introducir grandes iones en su superficie con el fin de causar en la misma esfuerzos compresivos.

vidrio templado térmicamente vidrio que se ha recalentado hasta casi su temperatura de ablandamiento y que se enfría después rápidamente en aire para introducir esfuerzos compresivos cerca de su superficie.

viscoelasticidad el tipo de respuesta mecánica en un material que depende de la velocidad de carga o de deformación.

vitrificación fundido o formación de un vidrio; el proceso de vitrificación se usa para producir un vidrio líquido viscoso en una mezcla cerámica después del recocido. Luego del enfriamiento, la fase líquida se solidifica y forma una matriz vítrea o vidriada que aglutina a las partículas no fundidas del material cerámico.

vulcanización reacción química que causa enlaces cruzados en las cadenas de polímeros. La vulcanización suele referirse al enlace cruzado de las cadenas moleculares del hule con azufre, pero la palabra también se usa para otras reacciones de enlace cruzado de polímeros como las que ocurren en algunos hules de silicio.

RESPUESTAS A PROBLEMAS SELECCIONADOS

Capítulo 2

2.6. 1.82×10^{21} átomos de Au

2.8. 6.27×10^{21} átomos de Mo

2.9. Atómica % Sn = 65.4 a%
Atómica % Pb = 36.4 a%

2.12. Cu_3Au

2.15. $\Delta E = 6.56 \times 10^{-19}$ J = 4.1 eV

2.17. **a.** $\Delta E = 0.66$ eV $= 1.06 \times 10^{-19}$ J
b. $\upsilon = 1.6 \times 10^{14}$ Hz **c.** $\lambda = 1876$ nm

2.19. $E = 9.30 \times 10^{-15}$ J
$\upsilon = 1.40 \times 10^{19}$ Hz

2.30. **b.** Mo [Kr] $4d^5\ 5s^1$
Mo^{3+} [Kr] $4d^3$
Mo^{4+} [Kr] $4d^2$
Mo^{6+} [Kr] $4d^3$

2.38. $F_{\text{de atracción}} = 9.16 \times 10^{-9}$ N

2.39. $E_{K^+Br^-} = -6.26 \times 10^{-19}$ J

2.42. $r_{Sr^{2+}} = 0.135$ nm

2.53. % enlace covalente = 47.75%
% enlace metálico = 52.25%

2.64. Mientras que un compuesto de 2 – 6 comúnmente tiene un carácter iónico más elevado que uno de 3 – 5, la electronegatividad relativamente alta del fósforo provoca que el InP sea de naturaleza más iónica.

Capítulo 3

3.11. 0.330 nm

3.13. 0.186 nm

3.16. 0.144 nm

3.18. 0.387 nm

3.25. 0.106 nm^3

3.26. 0.273 nm

3.31. **a.** Coordenadas de posición: (0, 0, 0), (1, 0, 0)
b. Coordenadas de posición: (0, 0, 0), (1, 1, 0)
c. Coordenadas de posición: (0, 0, 0), (1, 1, 1)

3.35. $[\bar{1}4\bar{1}]$

3.46. (100), (010), (001), $(\bar{1}00)$, $(0\bar{1}0)$, $(00\bar{1})$

3.48. **a.** (1, 0, 0), (1, 0, 1), (1, 1, 0), (1, 1, 1) (1, ½, ½)
b. (1, 0, 0), (1, 0, 1), (0, 1, 0), (0, 1, 1), (½, ½, 0), (½, ½, 1)
c. (1, 0, 0), (0, 0, 1), (0, 1, 0), (½, 0, ½), (½, ½, 0), (0, ½, ½)

3.49. $(6\bar{3}4)$

3.51. $(23\bar{4})$

3.52. $(\bar{1}\ \bar{1}2)$

3.54. $(\bar{1}2\bar{2})$

3.57. **a.** 0.224 nm **b.** 0.112 nm
c. 0.100 nm

3.58. **a.** 0.502 nm **b.** 0.217 nm

3.63. Los índices de Miller-Bravais para los planos que se muestran en la figura P3.63(a).
Los índices de Miller del plano *a* son $(0\bar{1}10)$.
Los índices de Miller del plano *b* son $(1\bar{0}\bar{1}2)$.
Los índices de Miller del plano *c* son $(\bar{2}200)$.
Los índices de Miller-Bravais para los planos que se muestran en la figura P3.63(b).
Los índices de Miller del plano *a* son $(0\bar{1}\bar{1}0)$.
Los índices de Miller del plano *b* son $(1\bar{1}01)$.
Los índices de Miller del plano *c* son $(1\bar{1}01)$.

3.65. $[\bar{1}\ \bar{1}21]$, $[\bar{2}111]$, $[\bar{1}2\bar{1}1]$, $[11\bar{2}1]$, $[2\bar{1}\ \bar{1}1]$, $[1\bar{2}11]$

3.67. Los índices de dirección de Miller-Bravais que se indican en la figura P3.67(*a*) son $[\bar{2}111]$ y $[11\bar{2}1]$). Aquellos asociados con la figura P3.67(*b*) son $[\bar{1}101]$) y $[10\bar{1}1]$.

3.71. 180.09 g/mol

3.74. **a.** 1.20×10^{13} átomos/mm^2
b. 8.50×10^{12} átomos/mm^2
c. 1.963×10^{13} átomos/mm^2

3.76. **a.** 3.29×10^6 mm **b.** 2.33×10^6 mm
c. 3.80×10^6 mm

3.80. −4.94%

3.86. 0.3303 nm

3.89. **a.** 0.50 ⇒ BCC **b.** 0.3296 nm
c. niobio (Nb)

3.91. **a.** 0.75 ⇒ FCC **b.** 0.38397 nm
c. iridio (Ir)

Capítulo 4

4.7. $r^* = 1.11 \times 10^{-7}$ cm

4.10. 327 átomos

4.19. **a.** bajo **c.** moderado **e.** bajo

4.21. 0.036 nm

4.28. 10.23

4.31. 9.64

Capítulo 5

5.3. **a.** 2.77×10^{24} vacantes/m^3
b. 2.02×10^{-5} vacantes/átomo

5.13. 56.6 min.
5.16. 0.394 wt %
5.17. 340 min. = 5.67 h
5.19. 1.03 mm
5.20. 1.98×10^{-4} cm
5.23. 0.707 μm
5.25. $D = 1.71 \times 10^{-15}$ m^2/s
5.26. $D = 8.64 \times 10^{-14}$ m^2/s
5.29. 139.3 kJ/mol

Capítulo 6

6.6. 0.0669 cm
6.13. 80.8%
6.14. 0.1255 in.
6.19. $\sigma = 962$ MPa
6.20. $\sigma = 954$ MPa
6.23. Deformación ingenieril $\varepsilon = 0.175$
6.29. **a.** Esfuerzo ingenieril = 125,000 psi
Deformación ingenieril = 0.060
b. Esfuerzo verdadero = 132,600 psi
Deformación verdadera = 0.0587
6.39. Los cuatros planos de deslizamiento principales son: (111); $(\bar{1}11)$; $(1\bar{1}1)$; $(11\bar{1})$. Las tres direcciones de deslizamiento son: $[\bar{1}10]$; $[01\bar{1}]$; $[\bar{1}01]$.
6.46. **a.** 30.6 MPa **b.** 0
6.48. $\sigma = 2.08$ MPa
6.49. **a.** 1.94 MPa **b.** 1.94 MPa
c. 0
6.52. **a.** 34.7 MPa **b.** 0
c. 34.7 MPa
6.64. **a.** 42.9%
b. Último máximo a la tensión ≈ 80 ksi; Resistencia a la cedencia ≈ 64 ksi; y Elongación ≈ 5%.

Capítulo 7

7.7. 0.015 in.
7.9. 50.9 ksi
7.12. 0.76 mm
7.13. 3.90 mm
7.19. **a.** 29 ksi (199.8 MPa) **b.** 14.5 ksi (99.9 MPa)
c. 10.5 ksi (72.3 MPa) **d.** −0.16
7.24. $\sigma = 149$ MPa
7.26. 0.176 in.
7.31. 1419 h
7.33. El esfuerzo es de aproximadamente 96 MPa
7.34. 186.2 h

Capítulo 8

8.16. **a.** Peso de la fase líquida = 364 g
Peso de la proeutéctica α = 136 g
b. Peso de la fase líquida = 251 g
Peso de la proeutéctica α = 249 g
c. 307.5 g
d. 192.5 g
8.17. 83.3% Sn y 16.7% Pb
8.24. 66.7%
8.26. % de peso de líquido = 14.3%
% en peso δ = 85.7%
8.29. **a.** % en peso α = 47.4%
% en peso L_1 = 52.6%
b. % en peso α = 72.2%
% en peso L_1 = 27.8%
c. % en peso α = 88.5%
% en peso L_2 = 11.5%
d. % en peso α = 90%
% en peso β = 10%
8.31. 10.8% Pb y 89.2% Cu

Capítulo 9

9.12. % en peso de austenita = 80.8%
% en peso de ferrita proeutectoide = 19.2%
9.14. 0.49% C
9.17. % en peso de austenita = 98.3%
% en peso de cementita = 1.7%
9.19. 1.08% C
9.20. 1.32% C
9.24. 0.232% C
9.68. alrededor de 53 RC
9.69. **a.** 40 RC **b.** 34 RC
9.73. 12°C/sec
9.80. Los componentes de la microestructura serán bainita, martensita y austenita.
9.96. 9.2%

Capítulo 10

10.1. 14,643 mers
10.4. 98 mers
10.6. Fracción de mols del poliestireno = 0.541
Fracción de mols del poliacrilonitrilo = 0.459
10.7. Fracción de mols del poliacrilonitrilo = 0.324
Fracción de mols del polibutadieno = 0.382
Fracción de mols del poliestireno = 0.294
10.9. 1.24 g S
10.13. 1.69%
10.17. % en peso S = 6.56%
10.18. **a.** 61.7 días **b.** 4.0 MPa
10.20. 37.65 kJ/mol
10.22. **a.** 35.7 días **b.** 65.95 días

Capítulo 11

11.7. 0.414
11.10. 4.87 g/cm^3
11.13. **a.** 4.96 g/cm^3 **b.** 7.27 g/cm^3
11.14. **a.** 0.577 **b.** 0.524
11.16. 2.95 g/cm^3
11.18. 6.32 g/cm^3
11.21. 18.1 O^{2-} o 9.1 Th^{4+} iones/nm^2
11.27. 6.03 g/cm^3
11.93. 736.7°C

Capítulo 12

12.20. **a.** % en peso de fibra de carbón = 76.0%
% en peso de resina de epóxica = 24.0%
b. 1.60 g/cm^3
12.23. 239.6 GPa
12.26. La resistencia del material compuesto = 30.48 GPa
La fracción de la carga que soportan las 49 fibras de Kevlar = 0.988
12.29. 9.40 GPa
12.54. Cantidad de cemento requerida = 22.43 sacos
Cantidad de grava requerida = 8012 lb
Peso requerido de arena mojada = 4126 lb
Peso requerido de agua requerido = 109 gal
12.81. 0.306
12.82. 222.2 GPa

Capítulo 13

13.12. −0.314 V
13.13. −0.403 V
13.17. 0.07 *M*
13.19. −0.046 V
13.26. 23.5 min
13.28. $1.07 \times 10^{-2} \frac{g}{min}$
13.31. 4.52×10^{-7} A/cm^2
13.34. 8.34×10^{-7} A/cm^2
13.64. 23.6 h
13.75. 0.65 A

Capítulo 14

14.7. 0.127 m
14.14. $2.36 \times 10^{-6}\ \Omega \times$ cm
14.15. −146.5°C
14.29. $0.45\ \Omega \cdot$ m
14.32. $17.4\ (\Omega \cdot m)^{-1}$
14.39. **a.** 7.51 cm^3 **b.** $6.61 \times 10^{-3}\ \Omega \cdot$ m
14.44. **a.** 6.17×10^{18} electrones/cm^3
b. 1.24×10^{-4}
14.70. **a.** i. InSb = 0.994
ii. InP = 0.979
b. i. InSb = 0.006
ii. InP = 0.021
14.78. 3675

Capítulo 15

15.11. **a.** 3.6% **b.** 4.4%
15.14. 0.903
15.16. **a.** 0.552 μm **b.** 1.83 μm **c.** 0.98 μm
15.23. 3.79×10^{-2} s
15.34. 5.67% de la luz se retiene
15.47. 0.046 T

Capítulo 16

16.23. $M_s = 1.70 \times 10^6$ A/m
la inducción por saturación es 2.14 T
16.24. 2.51×10^6 A/m
16.66. % en peso de Fe = 91.7%
% en peso de B = 2.97%
% en peso de Si = 5.33%

ÍNDICE ANALÍTICO

A

absorción
de luz, 859-860
de luz por una placa de vidrio, 860-861
de plástico, 862
absorptividad, 859, **883**
de metales, 859
de vidrios de silicato, 859-860
acero al medio carbón hipoeutectoide, 370-372, **456**
acero al medio carbón martensítico, 377
acero eutectoide
enfriamiento lento de, 366
microestructura de, 367
transformación de, con enfriamiento lento, 367
acero hipereutectoide, 366
acero hipoeutectoide, 366, 371
aceros. Vea también aceros aleados; aceros de baja aleación; aceros al medio carbón; aceros inoxidables
aceros al medio carbón eutectoides, **456**
diagrama de transformación isotérmica para, 378
diagrama de transformación por enfriamiento continuo para, 383-385, 398
enfriamiento lento de, 366
prueba de dureza de templado extremo de, 398
aceros al medio carbón no eutectoides, 383
aceros al medio carbón eutectoides, 366
atemplado de, 387-391
clasificación de, 391-392
efecto de la temperatura de atemplado en la dureza, 389
enfriamiento lento de, 366-372
martensíticos, dureza, 377
propiedades mecánicas de, 391-392, 393
recocido y normalización de, 386-387
tratamiento térmico de, 373-392
aceros al medio carbón, **457**
aceros de aleación
clasificación de, 392-394
curvas de dureza comparativa para, 399
diagrama de transformación de enfriamiento continuo para, 400
distribución de elementos aleantes en, 394-395
tipos principales de, 394
aceros de baja aleación, 392-401
aplicación de, 401
propiedades mecánicas para, 401
propiedades mecánicas y aplicaciones de, 402
aceros inoxidables
aceros inoxidables austeníticos, 426, 427-428
aceros inoxidables ferríticos, 424-425
aceros inoxidables martensíticos, 425-427
biometales, 449
propiedades mecánicas de, 426
acetales, 517
ácido poliglicólico (APG), 555, 556
ácido poliláctico (APL), 555
acortamiento, 694
acrílicos, 509-510
activadores, 863
aglomeración, 600, 641
aglomerados, 638
agregados, 638, 674, **710**
aisladores, 792
aisladores eléctricos, 782, **844**
aislamiento de superficie reutilizable de alta temperatura (HRSI), 620
albura, 686, 711
aleación endurecida por precipitación, 405
aleación hiperperitéctica, 339
aleaciones, 10, 446-448
aleaciones con memoria de forma, 442-446
intermetálicas, 441-442
metales amorfos, 446-448
propósito especial, 440-441
solidificación de no equilibrio de, 332-325
aleaciones Alclad, 766
aleaciones basadas en cobalto, 449-451
aleaciones binarias, 315, 403-410
efecto de alear elementos a temperatura eutectoide de, 395-396
producción de, 360-363
refinación de, 362
aleaciones con memoria de forma, 18, **458**
aleaciones, 442-446
aplicaciones de, 445
fase austenítica, 443
fase martensítica, 443
nitonol, 446
transformación inducida por esfuerzos, 445
aleaciones de alnico, **931**
estructura de, 918-919
propiedades y composiciones de, 917-918
aleaciones de aluminio, 401-418. Vea también aleaciones de aluminio forjado
aleaciones de aluminio forjado
clasificación de, 412
designaciones atempladas de, 412
fabricación primaria de, 411
propiedades mecánicas y aplicaciones, 414
tratables térmicamente, 415-416
aleaciones de aluminio moldeables, 414
propiedades físicas y costos de, 437
valores de fractura-tenacidad para, 281
aleaciones de aluminio moldeadas, 416-418
aleaciones de cobre. Vea también aleaciones de cobre moldeado; aleaciones de cobre forjado
aleaciones de cobre-berilio, 424
aleaciones de cobre forjado
clasificación de, 419
cobre de alta conductividad sin oxígeno (CACSO), 422
cobre electrolítico bien refinado, 422
cobre no aleado, 422-424
aleaciones de cobre moldeado, 419
aleaciones de hierro-cromo-cobalto, **931**
aleaciones de hierro-silicio, 910-911, **931**
aleaciones de ingeniería. Vea también metales ferrosos y aleaciones; metales no ferrosos y aleaciones
aleaciones de magnesio, 436-438
aleaciones forjadas, 436
aleaciones moldeadas, 436-437
clasificación de, 436-437
estructuras y propiedades de, 437-438
aleaciones de magnesio forjadas, 437-438
aleaciones de magnesio moldeables, 437-438
aleaciones de níquel
aleaciones de níquel comerciales, 440
aleaciones Monel, 440
propiedades mecánicas y aplicaciones de, 437-438
superaleaciones con base en níquel, 440-441
aleaciones de polímero, 521
aleaciones de tierras raras, 919-920, **931**
aleaciones de titanio, 438-440
aplicaciones ortopédicas, 452-453
biometales, 452-453
fase prima gama, 441
propiedades mecánicas y aplicaciones de, 437-438
prótesis de sustitución de rodilla, 452
aleaciones ferrosas, 359
aleaciones magnéticas de hierro-cromo-cobalto, 921-923
aleaciones magnéticas de niodimio-hierro-boro, 921
aleaciones metálicas, 453-455
aleaciones moldeables, 202
aleaciones no ferrosas, 359

alfa primaria, 327
alfa proeutéctica, 327
alotropía, 102-103
alótropos, 591-595
alto horno, 360
alumina (Al_2O_3)
  cerámicas de ingeniería, 609
  en aisladores cerámicos, 834-835
  en implantes dentales, 636-637
  en implantes ortopédicos, 634-636
  porosidad en, 613
aluminio. Vea también aleaciones de aluminio moldeado
  producción de, 410-411
  propiedades de ingeniería de, 410
  propiedades de, 410-411
aluminio superpuro, 138
ambiente, 288
ambulante, 709
amplificadores de fibra óptica impurificados con erbio (EDFAs), 875
amplitud de esfuerzo, 286
ampollamiento, 771
análisis de difracción por rayos x
  de estructuras cristalinas, 107-112
  interpretación de datos para metales con estructuras cristalinas cúbicas, 110-111
  método de polvo de, 107-108
análisis de la estructura cristalina, 103-113
  difracción por rayos x, 105-107
  fuentes de rayos x, 104-105
ángulo de pérdida dieléctrica, 833
anillo de benceno, 54
anillo de fenileno, 516
anillos de crecimiento, 687
anillos de crecimiento anular, 686
aniones, 39, **65**, 576
ánodos, 725, **770**
ánodos locales, 721, 729
antiferromagnetismo, 899, **930**
aparato de prueba de impacto, 277
aplicaciones biomédicas,
  aleaciones metálicas en, 9
  cerámicas en, 634-637
  implantes ortopédicos, 634-636
  respuesta a la resorción (disolución), 637
  respuesta bioactiva, 637
  respuesta biológicamente inactiva, 636
  respuesta tóxica, 636
aplicaciones cardiovasculares de biopolímeros, 553-554
aplicaciones oftálmicas, 554-555
aplicaciones ortopédicas
  aleaciones de titanio, 452-453
  aleaciones metálicas en, 453-455
  cemento de huesos, 566
  clavo intramedular, 450, 454
  placa y tornillos de hueso de compresión, 451
  placas de hueso, 450
  protección contra esfuerzos, 455
  prótesis, 634
  prótesis de cadera total, 635
  prótesis de sustitución de rodilla, 452
  temas en aplicación de, 453-455
aquebradización por hidrógeno, 758, 771
árbol Hevea brasieliensis, 531
árboles de madera blanda, 686, **711**
árboles de maderas duras, 686, **711**
árboles decidous, 686
árboles siempre verdes, 686
arcillas
  cerámicas tradicionales, 606
  composición química de, 607
arcillas refractarias, 620
arreglo geométrico de iones, 48
arreglos de dislocaciones, 244-246
arreglos de iones, 47-48
arreglos iónicos simples, 576-579
Arrhenius, Svante August, 175
asfalto y mezclas de asfalto, 684, **711**
atemplado
  cambios en la microestructura en la martensita luego de, 388
  de aceros al medio carbón, 387-391
atenuación, 870
atenuación de luz, **883**
átomo de hidrógeno, 29-33
átomo de hidrógeno de Bohr, 31
átomos, **65**
  estructura de, 25-26
  estructura electrónica de, 29-41
  posiciones en celdas unitarias cúbicas, 83-84
  y iones, tamaños relativos de, 36
átomos de impurezas donadoras, 800
átomos multielectrónicos, 35-39
austemplado, 390, **457**
austenítico, 363, 378-383, **456**
austenitización, 366, **456**
autodifusión, 178, **195**

B

Bain, E. C., 381
bainita, 381, 391, **456**
bainita inferior, 381
bainita superior, 381
Bakelita, 482
banda de conducción, **844**
banda de valencia, 844
banda deslizante, 229-231, **262**
bandas de corte, 304
bandas de deslizamiento persistentes, 286
bandas de energía, 790
barrera de difusión, 338
base, 74
base, 815
base de composición para un diagrama de fase ternaria, 346
bauxita, 411
benceno, 53-55
biocompatibilidad, 9, 448-449
biomateriales, 448
biomecánica de la fractura de hueso, 706-707
biometales
  aceros inoxidables, 449
  aleaciones basadas en cobalto, 449-451
  aleaciones de titanio, 452-453
  implantes ortopédicos, 449-450
  placa de hueso de compresión, 451
biopolímeros, **559**
  ácido poliglicólico (APG), 555, 556
  ácido poliláctico (APL), 555
  aplicaciones cardiovasculares de, 553-554
  aplicaciones oftálmicas, 554-555
  aplicaciones ortopédicas, 556-557
  hidrogel, 554
  lentes rígidos permeables al gas (LRPG), 555
  materiales hidrofílicos, 554
  membranas hidrofóbicas, 554
  sistemas de liberación de drogas, 555-556
  válvula de corazón artificial, 553
bitumen, 684
blenda de zinc (ZnS), 586-588
Bohr, Niels Henrik, 30
bolsa, 600
Borazon, 618
Bragg, William Henry, 107
Bravais, August, 74
bronces de cobre-estaño, 424
bronces estañados, 424
bronces fosforados, 424
Buckyball (fulerenos), 593, **640**
buckytube, **640**

C

cálculos de la regla de la palanca, 330
cálculos de vida por fatiga, 292-293
calor latente de solidificación, 135
campo crítico, **883**
campo crítico inferior, **883**
campo crítico superior, 877, **884**
campo eléctrico, 784
campos magnéticos, 889-890, **929**
campos y cantidades magnéticas, 889-894
cantidades magnéticas, 892
capacitancia, 832, **845**
capacitores, 831, 835-836, **845**
capas electrónicas, 35, 65
carbón, 386, 484
  enlace covalente por medio de, 51-53
  propiedades mecánicas de, en materiales compuestos y alótropos de, 591-595
carburización, 184-188

carburización de gas, 184-188
carburo de epsilon, 389
carburo de silicio (SiC), 13, 610
catalizador de hexametilenetetramina (hexa), 523-524
catalizador de metaloceno, 490
catalizador esteroespecífico, 490, **558**
catalizadores de Ziegler y Natta, 490-491
  estereoespecífico, 490
  hexametilenetetramina (hexa), 523-524
  metalocina, 490
  Ziegler y Natta, 490-491
cationes, **65**, 576
cátodo, 725
catodoluminiscencia, 864-865
cátodos locales, 721, 729
celdas de concentración de iones, 730-732, **770**
celdas de concentración de oxígeno, 732-733, **770**
celdas de parénquimia, 688, **711**
celdas electroquímicas de fase múltiple, 734-735
celdas electroquímicas de frontera grano-grano, 733-734
celdas galvánicas, 724-734, **770**
celdas galvánicas acuosas, 728
celdas galvánicas de concentración, 730-732
celdas unitarias, 73-74, 114, **115**
celdas unitarias cúbicas
  condiciones de difracción para, 108-110
  direcciones en, 84-87
  en posiciones de átomos, 83-84
  índices de miller, 88-93
celdas unitarias de empaquetamiento cerrado hexagonal (HCP), 94-95
celdas unitarias hexagonales, 93-95
celulosa, 690
cementita, **456**
  en el diagrama de fase de Fe-Fe_3C, 363
  eutectoide, 371
  formación de, 389
  proeutectoide, 371
  y ferrita alfa, estructura eutectoide no laminar de, 381
cementita eutectoide, 371, **456**
cementita proeutectoide, 371, **456**
cemento de hueso, 556
cemento portland, **710**
  composiciones de, 676
  composiciones químicas de, 676
  endurecimiento de, 677
  producción de, 675-678
  tipos de, 676
cerámicas
  cocimiento, 598
  conductividad térmica de, 618
  en aplicaciones biomédicas, 634-637
  extrusión de, 602
  falla por fatiga de, 615-617
  formación, 599-603
  materiales de bloques refractarios, 619
  moldeo por drenado de, 602
  moldeo por fundición, 602
  nanotecnología y, 637-639
  prensado, 600
  prensado en caliente, 602
  prensado en seco, 600
  prensado isostático, 600
  preparación de materiales, 599
  procesamiento de, 598-603
  propiedades eléctricas de, 830-841
  propiedades mecánicas de, 611-613
  propiedades térmicas de, 618-620
  secado y remoción de aglomerante de, 604
  sinterización, 604-605
  tratamientos térmicos de, 604-606
  vitrificación de, 605
cerámicas avanzadas, 12
cerámicas de ingeniería
  alumina (Al_2O_3), 609
  carburo de silicio (SiC), 610
  descripción, 12
  nirturo de silicio (Si_3N_4), 610
  propiedades mecánicas de, 610
  y cerámicas tradicionales, 606-611
  zirconia (ZrO_2), 610
cerámicas estructurales, 12
cerámicas ferroeléctricas, 838-839
cerámicas piezoeléctricas (PZT), 841
cerámicas piezoeléctricas, 18
cerámicas prensadas, 600
cerámicas tradicionales, 606-608
ciclo de esfuerzos completamente invertido, 285
ciclo de esfuerzos repetidos, 285
ciencia de materiales, 6-7, **21**
circuitos integrados, 188-191
circuitos integrados microelectrónicos, 821-822
circuitos microelectrónicos integrados a gran escala (LSI), 817-818
clasificación
clavo intramedular, 450, 454
cloruro de cesio (CsCl), 579-580
cloruro de polivinil (PVC)
  composición del cloruro de polivinil, 503-504
  datos de esfuerzo por tensión-deformación para, 544
  estabilizadores térmicos, 503
  estructura y propiedades de, 503
  lubricantes, 503
  plasticizadores, 503-504
  rellenos, 504
cloruro de polivinil rígido, 503-504
cloruro de polivinil y copolímeros, 503-504
cloruro de sodio (NaCl), 580-584
CMC discontinuo (hilo), 700
CMC reforzada de fibra continua, 700
CMC reforzados por partículas, 700
CMM de fibra discontinua, 698
CMM reforzada de fibra continua, 696, 697
CMM reforzados por partículas, 698
cobre de conductividad elevada libre de oxígeno (CELO), 422
cobre electrolítico bien refinado, 422
cociente de esfuerzos, 286
cociente de Pilling-Bedworth (P.B.), 759-760, 771
cociente de Poisson, 216, 217
cociente del radio crítico (mínimo), 577, 640
cociente del radio, 577, 640
coeficiente de absorción lineal, 860
coeficientes de difusión, 181, 194
coeficientes de resistividad de temperatura, 788
colágeno, 703, **711**
colector, 815
componentes de diagrama de fase, **349**
componentes metálicos, falla de, 300-302
comportamiento de crecimiento de grietas por fatiga, 291
comportamiento por fatiga, 305
comportamiento viscoelástico, 546
composición eutéctica, 326, 327, **350**
composiciones hipereutécticas, 327, **350**
composiciones hipoeutécticas, 327, **350**
composiciones minerales de silicato, 598
composiciones químicas
  de cemento portland, 676
  de whiteware triaxial, 607
compuerta, 819
compuesto de matriz de polímero (CMP), 14
compuesto de moldeo de placa (CMP), **710**
compuesto fundido congruentemente, 344
compuesto incongruentemente fundido, 344
compuestos binarios, 663
compuestos cerámicos, 703
compuestos cerámicos simples
  enlaces iónicos y covalentes en, 575-576
  puntos de fusión de, 575
compuestos de fibra de vidrio-poliestireno, 659
compuestos de matriz cerámica (CMC), 14, 700-703
compuestos de matriz cerámica reforzados con hilos de SiC, 701
compuestos de matriz metálica (CMM), 14, 696-700
compuestos de partículas, 14
compuestos fibrosos, 14
compuestos intermetálicos, 343
comunicaciones por fibra óptica, 874-875, **883**
concentraciones de esfuerzos, 279, 287

concentraciones de portadores
en semiconductores extrínsecos, 804-805
en semiconductores intrínsecos, 804
concreto, 674-684
agregados para, 679
cociente agua-cemento, 680
entrada de aire de, 679
mezcla de agua para, 678-679
postensionado, 683
preesforzado, 682-683
pretensionado, 683
proporción de mezclas, 679-682
proporciones de componentes de, 681
reforzado, 682-683
resistencia compresiva de, 678, 679
tipo de cemento portland, 710
concreto con entradas de aire, 679, **711**
concreto postensionado, 683-684
concreto preesforzado, 682-684, **711**
concreto pretensionado (preesforzado), 683, **711**
concreto reforzado, 682-683, **711**
condición sensibilizada, 752
condición superficial, 288
condición verde, 692
condiciones de difracción, 108-110
condiciones de estado estable, 180, **195**
condiciones de isodeformación, 6+62, 663
condiciones de isoesfuerzos, 664
conducción eléctrica, 779-789
conductividad atómica, 181
conductividad eléctrica, 782, **844**
conductividad térmica de cerámicas, 618
conductor eléctrico, **844**
configuración electrónica, 35-39, **65**
constante de Boltzmann, 173
constante de Planck, 30, 855
constante dieléctrica, 831, 832, **845**
constantes de la relación de Hall-Petch, 243
constantes de retícula, 74
constantes elásticas para materiales isotrópicos, 217
contenido de húmedad en madera, 692
control de corrosión, 764-769
copa acetabular (AC) en implantes ortopédicos, 634-636
copolimerización, **558**
copolímeros, 479-482, **558**
copolímeros aleatorios, 479
copolímeros alternos, 479
copolímeros de bloque, 479
copolímeros de estireno-acrilonitrilo (resinas SAN), 407
copolímeros de injerto, 479
Copper Development Association (CDA), 419
corindón (Al_2O_3), 590
corrales cuánticos, 841
corriente de fuga, 811
corriente eléctrica, **843**
corriente minoritaria, 811
corrientes parásitas, 910
corrosión, **770**
ataque general, 745
corrosión de dos metales, 745-746
definición, 719
e impurezas, 735
efecto del tratamiento térmico en, 735
galvánica, 745-746
tipos de, 745-759
uniforme, 745
corrosión de dos metales, 745-746
corrosión electroquímica, 720-723
corrosión galvánica, 745-746
corrosión intergranular, 751-753, **771**
corrosión por ataque general, 745
corrosión por desgaste, 757
corrosión por erosión, 756
corrosión por esfuerzo, 753-754, **771**
corrosión por hendiduras, 749-751
corrosión por picaduras, 746-749, **771**
corrosión uniforme, 736, 745
corteza exterior, 686
corteza interior, 686
Coulomb, Charles Augustin, 43
crecimiento de fisura, 286
crecimiento de grano anormal, 305
crecimiento de grano, **263**
crecimiento de grieta de banda deslizante, 286
crecimiento de grietas por fatiga, 286
cristal, **115**
cristales, 132-133
cristales individuales metálicos
deformación plástica de, 229-242
esfuerzos de corte resueltos críticos para, 235-237
sistemas de deslizamiento en, 238
cristales policristalinos, 132, 134
cristalinas cúbicas, 110-111
cristalinidad
en polímeros, **558**
en termoplásticos, 486-490
cristobalita, 597
curado por peróxido, 528
curva característica del diodo zener (avalancha), 814
curva de enfriamiento temperatura-tiempo, 329
curva de envejecimiento, 405
curva de esfuerzo real-deformación real en función del diagrama de esfuerzo-deformación de ingeniería (nominal), 226
curvas de desmagnetización, 916
curvas de enfriamiento, 314-315, **349**, 389
curvas de escurrimiento plástico, 294, 296, 547
curvas de esfuerzo-deformación
para tejidos corticales (hueso), 705-706
para tejidos trabeculares (hueso), 705
curvas de esfuerzo-deformación de ingeniería, 225
curvas de templabilidad, 399

D

daño por cavitación, 756-757
daño por hidrógeno, 758-759
datos de esfuerzo por tensión-deformación
para cloruro de polivinil (PVC), 544
para poliestireno (PS), 544
datos de tiempo-temperatura de ruptura por escurrimiento plástico, 298-300
datos de tiempo-temperatura de ruptura por esfuerzos, 298-300
de aceros al medio carbón, 391-392
de aceros de aleación, 392-394
de aleaciones de aluminio forjado, 412
de aleaciones de cobre, 419-421
de aleaciones de magnesio, 436-437
decaimiento de soldadura, 752, 771
defectos, 151-165
defectos autointersticiales, 144
defectos de plano, 147-150
defectos en volumen, 150
defectos lineales (dislocaciones), 144-147
defectos puntuales
imperfección de Frenkel, 144
imperfección de Schottky, 144
vacantes, 143-144
defectos tridimensionales, 150
deformación, 294
deformación de ingeniería, 213-215, **262**
deformación de ingeniería, 220-225
deformación dependiente del tiempo, 294
deformación plástica
de cristales individuales metálicos, 229-242
de metales policristalinos, 242-247
descripción, 213
durante el deslizamiento de bandas, 230
efecto de, en la forma de grano, 244-246
efecto de, en los arreglos de dislocaciones, 244-246
mediante mecanismo de deslizamiento, 232-233
y fractura dúctil, 272
deformación plástica en frío, 246-247
deformación por corte, 216-217, **262**
deformación porcentual, 215
deformación viscosa, 626-628
deformaciones elásticas, 213, **262**
dendritas, 124
densidad atómica lineal, 101
densidad atómica plana, 99-100
densidad de corriente, 784, 877
densidad de corriente crítica, **883**
densidad de corriente eléctrica, **844**

densidad de flujo, 892
densidad de plano, **116**
densidad de volumen, 98-99, **115**
densidad lineal, **116**
depositación de vapor química modificada (DVQM), 873
descomposiciones isotérmica de austenita, 378-383
designaciones de templado de aleaciones de aluminio forjado, 412
deslizamiento, 230, **262**
deslizamiento de fronteras de grano, 258
desmagnetización, 907-914
desviación de fisura, 700
determinación del diámetro de grano, 151-155
diagrama de bandas de energía, 794-795
diagrama de fase de cobre-níquel, 317
diagrama de fase de cobre-plomo, 340
diagrama de fase de cobre-zinc, 342
diagrama de fase de equilibrio Ag-Pd, 322
diagrama de fase de equilibrio de Cu-Ni, 317
diagrama de fase de equilibrio de plomo-estaño, 326
diagrama de fase de hierro-cromo, 425
diagrama de fase de hierro-níquel, 335
diagrama de fase de platino-plata, 336
diagrama de fase de titanio-níquel, 344
diagrama de fase del magnesio-níquel, 344
diagrama de fase Pb-Sn, 332
diagrama de fase peritéctica binaria, 338
diagrama de fase presión de agua-temperatura (PT) para, 312
diagrama de fase presión-temperatura (PT), 311, 312
diagrama de niveles de energía, 32
diagramas de esfuerzo-deformación de ingeniería, 217-227, **262**
diagramas de fase
  con fases y compuestos intermedios, 341-345
  de sustancias puras, 311-313
  definición, 310
  del sistema Al_2-SiO_2, 343
diagramas de fase binaria
  diagramas de fase binaria de ZrO_2-MgO, 616
  para deducir las ecuaciones de la regla de la palánca, 319
diagramas de fase de carburo de hierro-hierro, 366
  fases sólidas en, 363
  reacciones invariantes en, 364-365
diagramas de fase de equilibrio, 311, **349**
diagramas de fase ternaria, 345-348
  base de composición para un, 346
  de sílice-leucita-mullita, 608
  de una sección isotérmica, 347
diagramas de transformación de enfriamiento continuo (TEC), **457**
  para acero al carbón eutectoide, 398
  para acero al medio carbón eutectoide, 383-385
  para aceros aleados, 400
diagramas de transformación isotérmica (IT), **457**
  a partir de la transformación isotérmica de aceros eutectoides, 379
  de un acero eutectoide, 380
  para aceros al medio carbón no eutectoides, 383
diamagnetismo, 895-895, **930**
diamante, 52, 592-593
dibujo de alambrado, 211, **262**
dibujo profundo, 212
dieléctricos, 831-832, **845**
difusión atómica, 177-184
difusión de estado estable, 180-182
difusión de estado no estable, 184-191, **195**
difusión de estado sólido, 322
difusión de fronteras de grano, 258
difusión de impurezas, 188-191
difusión intersticial, 180, **195**
difusión,
  atómica, en sólidos, 177-184
  autodifusión, 178, 179
  de estado estable, 180-182
  de estado no estable, 184-191
  de impurificaciones, 822-824
  de un gas en un sólido, 183
  difusión de impurezas en obleas de silicio, 188-191
  en sólidos, efecto de la temperatura en, 191-195
  intersticial, 180
  mecanismo de vacantes, 177-178
  mecanismo sustitucional, 177-178
  primera ley de Fick, 181
  segunda ley de Fick, 182
  soluto-solvente, 182
difusividad (conductividad atómica), 181, **195**
difusividades
  datos para algunos sistemas metálicos, 192, 193
  para sistemas de difusión soluto-solvente, 182
diodo de unión *pn*
  aplicaciones de, 813-814
  en equilibrio, 810
  polarizado directamente, 811-812
  polarizado inversamente, 810-811
diodos de ruptura, 813-814
diodos rectificadores, 813, **845**
diodos zener, 813-814
dipolos fluctuantes, 60-61
dipolos permanentes, 61-62
dirección de duplicación, 240
direcciones
  cristalográficamente equivalentes, 85
  en celdas unitarias cúbicas, 84-87
  en celdas unitarias hexagonales, 93-95
direcciones cristalinas, 114
direcciones cristalográficamente equivalentes, 85
direcciones del empaquetamiento cerrado, 114
discos de video digital (DVD), 10
dislocaciones, 144-147, 232
dislocaciones de borde, 145, 232-233
dislocaciones mezcladas, 145
dislocaciones tipo tornillo, 145
dispositivos de portadores mayoritarios, 820
dispositivos de semiconductor de óxido metálico complementario (CMOS), 827-828
dispositivos semiconductores, 809-816
distancia de separación
  en función de la energía, 57
  en función de la fuerza, 44
distancia de separación interiónica, 44
dominios, 374
dominios de cierre, 906
dominios ferroeléctricos, 838
dominios ferromagnéticos, 900-907
dominios magnéticos, 896-897, 900, **930**
drenaje, 819
dúctil a la temperatura de transición quebradiza, 276-278
dúctil a la transición quebradiza (DTQ), 276, 306
ductilidad, 223, 303-305
duplicación, 240-242
dureza, 227-228, **262**, 389
dureza C Rockwell, 397

E

ecuación de Bohr, 30
ecuación de Faraday, 736
ecuación de Hall-Petch, 242-243, 259
ecuación de Nernst, 726
ecuación de Pauling, 63
ecuación de velocidad de Arrhenius, 176, **195**
efecto de Kirkendall, 179
efecto del área, 746
efecto Hall-Petch negativo, 260
efecto Meissner, 877-878, **883**
efecto piezoeléctrico (PZT), 839
efecto piezoeléctrico, **845**
eje longitudinal (L), 686
eje radial (R), 686
eje tangencial (T), 686
elastómeros de policloropreno
  hules de neopreno, 535-536
  hules de silicón, 537-538
  propiedades de, 536

vulcanización de, 536-539
elastómeros (hules), 531-539, **559**
descripción, 469
hule natural, 531-534
hules sintéticos, 534-536
propiedades de, 534
eléctrica, 795-796
electrodepositación, 736
electrón, **844**
electronegatividad, 40-41
electrones, 25
electrones de conducción, 793
electrones de valencia, 55, 66, 790, 793
electrones del núcleo, 790
electrones libres, 473
elementos
configuración electrónica de, 36-39
en la corteza terrestre, 4
números de oxidación de, 40
radios iónicos para ciertos, 47
elementos de estabilización de ferritas, 396
elementos de vaso, 689
elementos electropositivo y electronegativo, 39
elongación porcentual, 215, 223
embrión, 128
emisor, 815
empaquetamiento denso, 576
endurecimientio del empaque, 184-188
endurecimiento de solución sólida (reforzamiento), 247-248, **263**
endurecimiento por deformación (reforzamiento), 246, **263**
endurecimiento por transformación, 615
energía de activación, 173, **195**
energía de anisotropía magnetocristalina, 903-904, **930**
energía de intercambio, 902-903, **930**
energía de ionización, 32, **65**
energía de la superficie, 127
energía de pared de dominio, 904-905, 906, **930**
energía de retícula, 49
energía en función de la distancia de separación, 57
energía libre en volumen (o masa), 127
energía magnetoestrictiva, 905-906, **931**
energía magnetostática, 903, **930**
energías de activación de autodifusión, 179
energías de enlace,
de metales del cuarto periodo, 58
de sólidos iónicos, 48-49
energías interiónicas, 46-47
enfriamiento lento, 327
enlace covalente, 49-55, **66**
en molécula de hidrógeno, 49-50
en moléculas diatómicas, 50-51
en moléculas que contienen carbón, 53
energías y longitudes de enlace de enlaces seleccionados, 52
estructura de moléculas de etileno, activada, 472
notación de línea recta, 51
notación de punto-electrónico para, 51
por medio de carbón, 51-53
enlace covalente carbón-carbón, 54
enlace covalente tetraédrico, 52
enlace cruzado, 532-533, 558
enlace de amido, 513
enlace de hidrógeno, 61-62, **66**
enlace hibridizado dsp, 57
enlace iónico y covalente, 575-576
enlace mezclado, 62-63
enlace mezclado iónico-covalente, 62-63
enlace no direccional, 56
enlace no localizado, 55
enlace secundario, 59-68
enlaces atómicos, 41-42
enlaces atómicos primarios, 42
enlaces atómicos secundarios, 42
enlaces covalentes, 42
enlaces de dipolo fluctuantes, 42
enlaces de dipolo permanente, 42, **66**
enlaces de van der Waals (fuerzas), 60
enlaces iónicos, 42-49, **65**
enlaces metálicos, 42, 55, **66**
enlaces mezclados metálico-covalente, 63
enlaces mezclados metálico-iónico, 64
enlaces moleculares secundarios, 42
enlaces moleculares, 41-42
enlaces no saturados, 53
enlaces químicos, 41
enrollamientos, 147
envejecimiento
de aleaciones de cobre, estructuras formadas durante, 407
de soluciones sólidas supersaturadas, 404
envejecimiento artificial, 404
envejecimiento natural, 404
equilibrio, 311, **349**
escalpado, 412
escurrimiento plástico de estado estable, 295
escurrimiento plástico, **306**
de materiales poliméricos, 546-547
de metales, 294-298
esferoidita, 389, **457**
esfuerzo de corte crítico resuelto, 235-237
esfuerzo de corte, 216-217, 232, **262**
esfuerzo de ingeniería, 213-215, **262**
esfuerzo medio, 286
correlación de propagación de fisuras por fatiga con, 288-293
en función del número de ciclos (SN) debido a falla
esfuerzo por fatiga en función de las gráficas de ciclos, 285
esfuerzo real y deformación real, 225-227
esfuerzo y deformación, 212-217
esfuerzos cíclicos, 285-286
esmalte de porcelana, 632, **642**
esmalte de vidrio, **642**
espaciamiento interplanar, 91
espécimen con fatiga por haz rotatorio, 283
espécimen de tensión, 215
especímenes de prueba de tensión, 219
espectro electromagnético, 853-854
espejismo cuántico, **893**
espejo de deformación, 241, 263
espinela ($MgAl_2O_4$), 590
espines paralelos, 37
estabilizadores térmicos, 503
Estación Espacial Internacional (ISS), 5
estado, 791
estado base, 32, 65
estado superconductor, **883**
esteatita, 834
estereoisomerismo, 486-490
estereoisómero atáctico, 489, **558**
estereoisómero isotáctico, 489
estereoisómero sindiotáctico, 489
estereoisómeros, 489, **558**
estopa (de fibras), 709
estructura. Vea también estructuras cristalinas
con núcleo, 322
de acetales, 517
de aleaciones de alnico, 918-919
de átomos, 25-26
de cloruro de polivinil (PVC), 503
de copolímeros de estireno-acrilonitrilo (resinas SAN), 507
de fenólicos, 524
de hule natural, 531-532
de materiales termoplásticos parcialmente cristalinos, 488-489
de poliacrilonitrilo, 506-507
de poliamides (nilons), 513-514
de policarbonatos, 515-516
de policlorotrifluoroetileno (PCTFE), 511
de poliésteres no saturados, 529
de poliésteres termoplásticos, 518
de poliestireno, 506
de polímeros lineales no cristalinos, 476-477
de polipropileno, 505
de polisulfona, 519
de politetrafuoroetileno (PTFE), 510-511
de resinas basadas en óxido de fenileno, 516-517
de resinas de urea-formaldehído, 530
de resinas epóxicas, 526
de terpolímeros de acrilonitrilo-butadieno-estireno (resinas ABS), 507-508
de vidrios, 623-624
estructura con núcleo, 323, **350**
estructura cristalina de antiflorita, 590
estructura cristalina tetragonal centrada en el cuerpo (BCT), 376
estructura de espinela inversa, 925-926, **931**

estructura de espinela normal, 925, **931**
estructura de grano
de moldeos industriales, 133-134
formación de, 132-133
estructura de panal emparedado, 695
estructura electrónica
de átomos multielectrónicos, 35-39
y reactividad química, 39-41
estructura eutéctica laminar, 333, 334
estructura metálica trabajada en frío, 250-251
estructuras aciculares, 333
estructuras cristalinas, **115**. *Vea también* estructuras cristalinas cúbicas centradas en el cuerpo (BCC); estructuras cristalinas cúbicas centradas en las caras (FCC); estructuras cristalinas de empaque cerrado hexagonales (HCP)
estructuras cristalinas cerámicas simples, 575-595
análisis de refracción de rayos x de, 107-112
cerámicas simples, 575-595
cúbicas, 615
de antiflorita, 590
de blenda de zinc (ZnS), 586-588
de cloruro de cesio (CsCl), 579-580
de cloruro de sodio (NaCl), 580-584
de corindum (Al2O3), 590
de espinela ($MgAl_2O_4$), 590
de floruro de calcio (CaF2), 588-590
de perovskita (CaTiO3), 590-591
metálicas, 75-77
monoclínicas, 615
sistemas de deslizamiento en, 236
tetragonal centrada en el cuerpo (BCT), 376
tetragonales, 615
estructuras cristalinas cúbicas, 615
estructuras cristalinas cúbicas centradas en las caras (FCC), 56, 75, 80-81, 96-98, 114, **115**
estructuras cristalinas cúbicas centradas en el cuerpo (BCC), 75, 77-80, 98 114, **115**
estructuras cristalinas de empaquetamiento cerrado hexagonal (HCP), 75, 81-83, 96-98, 114, 115
estructuras cristalinas metálicas, 75-77
estructuras cristalinas monoclínicas, 615
estructuras cristalinas tetragonales, 615
estructuras de aleaciones de magnesio, 437-438
estructuras de anillo, 595
estructuras de forma de barra, 333
estructuras de isla, 595
estructuras de placa de silicatos, 595-597
estructuras de silicato, 595-598
estructuras de isla, cadena y anillo de, 595
estructuras de placa de, 595-597
unidad estructural básica de, 595
estructuras en cadena, 595
estructuras eutécticas, 333
estructuras globulares, 333
estructuras laminares, 333
estructuras metálicas forradas, 695-696
etapa de carbonización, 654
etapa de estabilización, 654
etapa de predepósito, 824
eutectoides, 379
extensómetro, 219, 223
extrusión, **262**
de cerámicas, 602
definición, 133
de metales y aleaciones, 208-209
de termoplásticos, 493-494, **559**
extrusión directa, 209
extrusión indirecta, 209
extrusiones de banda deslizante, 286

F

fabricación de acero, 364-365
fabricación de acero y procesamiento, 361-363
factor de empaquetamiento atómico (FEA), 79, **115**
factor de intensidad de esfuerzo, 279
factor de pérdida dieléctrica, 831, 833
falla, 271, 303-302
falla de apilamiento, 150
falla del Titanic, 270
falla dúctil final, 287
fallas por apliamiento, 147, 150
fallas por fatiga, 281, **306**, 615-617
familia de formas, 85, 89
farad, 832
Faraday, Michael, 736
fase, 310, **349**
fase primaria, **350**
fase proeutéctica, **350**
fases intermedias, 341, **351**
fases sólidas, 311
fases terminales, 341, **351**
fatiga, 281-288, **306**
fatiga por corrosión, 288
fatiga por flexión inversa, 301
feldespatos, 598, 606
fenólicos
catalizador de hexametilenetetramina (hexa), 523-524
estructura y propiedades de, 524
tipos de compuestos de moldeo, 524
fenómeno de encierro, 337-338, 339
fenómenos del medio, 337-338, 339
ferrimagnetismo, 899-901, **930**
ferrita alfa, 363, 381, **456**
ferrita alfa eutectoide, **456**
ferrita alfa proeutectoide, **456**
ferrita de bario, 928
ferrita delta, 314, 363
ferrita eutectoide, 369, 371
ferrita proeutectoide, 368
ferritas, 899, 9203-924
ferritas blandas, **931**
ferritas blandas cúbicas, 923-924
ferritas duras, **931**
aleaciones de alnico, 917-918
aleaciones de tierras raras, 919-920
aleaciones magnéticas de hierro-cromo-cobalto, 921-922
aleaciones magnéticas de niodimio-hierro-boro, 921
curvas de desmagnetización de, 916
descripción, 889
propiedades de, 915-916
propiedades magnéticas de, 917
ferritas magnéticamente blandas, 923-924
ferritas magnéticamente duras, 928
ferromagnetismo, 896-897, **930**
fibras, 672
fibras de aramida, **709**
en materiales compuestos, 651
para reforzamiento de resinas plásticas, 654-655
propiedades mecánicas de, 655-657
fibras de carbón
para plásticos reforzados, 653-654
para un material compuesto, **709**
fibras de refuerzo
comportamiento esfuerzo-deformación de, 656
módulos de tensión específica de, 657
resistencia a la tensión específica de, 656
fibras de vidrio
propiedades mecánicas de, para materiales compuestos plásticos reforzados, 655-657
fibras de vidrio e, 651, **709**
fibras ópticas
fabricación de, 873-874
pérdida de luz en, 870-871
unimodo y multimodo, 871-872
Fick, Adolf Eugen, 181
fisuras por corrosión por esfuerzos
mecanismos de, 754-755
prevención de, 755-756
flujo de corriente eléctrica, 781
flujo viscoso, 547
fluorescencia, 863, **883**
fluoroplásticos, 510-511
fluoruro de calcio, (CaF_2), 588-590
fluxoides, 879, **884**
fonones, 786
forja, 209-211, **262**
forja con prensa, 209-211
forja de matriz abierta, 209-211
forja de matriz cerrada, 209-211
forja por aglomeración, 638

forma de grano, 244-246
formación de cerámicas, 599-603
formación de núcleos, 338
formas de productos de acero, 361-362
fosforescencia, 863, **883**
fósforos, 863
fosterita, 834
fotolitografía, 821-824
fotoluminiscencia, 864
fotones, 29, 65, 855
fotoresist, 824
fracciones de peso, 320
fractografía, 282
fractura
  de materiales poliméricos, 550-552
  de metales, 271-281
  definición, 727
  hueso, biomecánica de, 706-707
fractura dúctil de copa y cono, 273
fractura por ductilidad, 272-273, **306**
fractura por fragilización, 270, 273-276, **306**, 550
Frenkel, Yakov Ilyich, 144
frontera inclinada de ángulo pequeño, 149
fronteras de ángulo bajo, 147
fronteras de ángulo elevado, 147
fronteras de grano, 132, 147-148, 153, 242-244
fronteras gemelas (gemelos), 149
fuente, 819
fuerza coerciva, 907, **931**
fuerza electromotriz (fem), 725
fuerza en función de la distancia de separación, 44
fuerzas coulombianas, 43
fuerzas interiónicas, 43-46
fulerenos (Buckyball), 386, 593
funcionalidad, 476, **558**
fundición de matriz, 416-418
fundido por deslizamiento, 602, 641
fusión en molde permanente, 416

G

garganta, 223
gas natural, 484
gases nobles, 39, 61
gel coloidal, 677
gemelo de deformación, 149
gemelo de recocido, 149
gemelos, 147
gemelos de transformación, 375
germanio, 795
Gibbs, Josiah Willard, 313-314
goniómetro, 108
Goodyear, Charles, 532
grabado, 153
grado de polimerización (GP), 473, **558**
grados de libertad, 313, **349**
grafeno, 594
gráficas de Arrhenius, 193
gráficas de esfuerzo por tensión-deformación, 539-540
grafitización, 435
grafito, 592, **640**
gramo mol, 26
granos columnares, 133
granos de ejes iguales, 127, 132
grietas pequeñas, 550-551
grupos de aleaciones de aluminio forjadas
  celdas unitarias cúbicas, 413
  designaciones atempladas, 412
  sin tratamiento térmico, 413
  subdivisiones endurecidas por deformación, 413
  subdivisiones tratadas térmicamente, 413
guías de onda ópticas, 871, **883**
gutapercha, 531

H

haz láser, 883
Heisenberg, Werner Karl, 32
hemicelulosa, 690
hibridización, 51-52
hidrato de silicato de tricalcio, 677
hidrocarburos, 54
hidrogel, 554, **559**
hidroxiapatita (HA), 703, **711**
hierro
  curvas de enfriamiento para, 314
  diagrama de fase presión-temperatura (PT) para, 312
  producción de, 360-363
hierro alfa, 314
hierro de primera fusión, 360
hierro delta, 314
hierro dúctil, 432-434, **457**
  composición y microestructura de, 433
  propiedades de, en función de la dureza, 434
  propiedades mecánicas de, 430
hierro fundido de grafito esferulítico, 432
hierro gamma, 315
hierro moldeable gris; hierros moldeables maleables;
hierro moldeado gris, **457**
  composición y microestructura de, 431-432
  propiedades mecánicas de, 430
hierro moldeado nodular, 432
hierros fundidos blancos, 419-431, **457**
hierros fundidos dúctiles. *Vea* hierro dúctil
hierros moldeables blancos
hierros moldeados, 429-436. Vea también hierro dúctil.
hierros moldeados maleables, **458**
  composición y microestructura de, 435
  enfriamiento de, 436
  grafitización de, 435
  hierro maleable ferritico, 436
  hierro maleable martensítico templado, 436
  hierro maleable perlítico, 436
  propiedades mecánicas de, 430
  tratamiento térmico de, 435
hilos de carburo de silicio, 698
histéresis, 443
homogenización, 323, **350**
homopolímeros, **558**
homopolímeros y copolímeros, 479-482
Hooke, Robert, 221
horno de oxígeno básico, 361
huecos, 793-794, **844**
hueso, **711**
  composición de, 703
  macroestructura de, 703-705
  propiedades mecánicas de, 705-706
  viscoelasticidad de, 707
hueso canceloso (trabecular), 703-704, **711**
hueso cortical (compacto), 703-704, **711**
hule natural
  árbol Hevea brasieliensis, 531
  estructura de, 531-532
  látex, 531
  producción de, 531
  propiedades de, 533-534
  vulcanización, 532
hules, 469
hules de estireno-butadieno (SBR), 535
hules de neopreno, 535-536
hules de silicón, 537-538
hules sintéticos
  elastómeros (hules), 534-536
  hules de nitrilo, 535
  policloropreno (neopreno), 535-536
  hule de estireno-butadieno (HSB), 535
Hume-Rothery, William, 316

I

imagen de campo brillante, 158-159
imagen de campo oscuro, 158-159
imperfección de Frenkel, 144
imperfección de Schottky, 144
imperfecciones cristalinas, 143-150
  defectos de línea (dislocaciones), 144-147
  defectos en volumen, 150
  defectos planos, 143-144
  defectos puntuales, 143-144
implantación de iones, 822-825
implantes dentales, 634-637
implantes ortopédicos
  en copa acetabular (CA), 634-636
  alumina (Al_2O_3) en, 634-636
  aceros inoxidables en, 449-450
  protección contra esfuerzos en, 636

impurificadores
difusión de, 822-824
en material semiconductor de silicio extrínseco, 803
implantación de iones de, 822-824
incrementadores de esfuerzos, 275, 301
índice de refraccción, 856-857, **883**
índices de dirección en cristales cúbicos, **115**
índices de dirección, 84, 94-95
índices de Miller, 88-93
índices de Miller-Bravais, 93
índices de una familia de forma, 85
índices para planos cristalinos cúbicos (índices de Miller), **115**
índices refractivos, 857
inducción, 892
inducción magnética, 892-893, **930**
inducción por saturación, 907, **931**
inducción remanente, 907, **931**
ingeniería:compuestos cerámicos
aislamiento de losetas para el orbitador del taxi espacial, 620
descripción, 11-13, 573
factores que afectan la resistencia de, 612-613
mecanismos para la deformación de, 611-612
para capacitores, 835-836
para resistencia a la corrosión, 765
prueba de fractura-tenacidad de, 614
tenacidad de, 613-615
ingeniería de materiales, 6-7, **21**
ingeniería de superficies, 632-634
inhibidores, 767-768
inhibidores tipo absorción, 768
inhibidores tipo lavado, 768
iniciación de fisura, 286
iniciación de polimerización, 473-475
integración osea, 708
intermetálicos, **458**
intersticialicidad, 144
intersticios, 141
intervalo de escape, 808
intervalo de esfuerzos, 286
intervalo de saturación, 808
intervalo de temperatura de sensibilización, 751
intrusiones de banda deslizante, 286
inversión de población, 867, 883
iones, 576
iones negativos, 39
iones positivos, 39
isómero isostáctico, **558**
isómero sindiotáctico, 491, **558**
isómeros estructurales, 532

K

Kevlar, 654

L

lámina, 489
laminado compuesto de fibras de carbón y resina epóxica, 659
laminado multidirecciónal, **709**
laminado unidireccional, **709**
láser, 866-870, **883**
bombeo de, 867
onda continua (OC), 868
tipo pulsado, 868
tipos de, 868-869
láser de dióxido de carbón, 869
láser de heterounión doble (HD), 870
láser de niodimio-itrio-aluminio-granate, 869
láser de onda continua (OC), 868
láser de rubí, 869
láser semiconductor, 869-870
láser tipo pulsado, 868
látex (hule natural), 531
latón sin corte, 423
lazo de histérisis, 908, 931
lentes rígidos permeables al gas (PGR), 555
Lexan (policarbonato), 515
ley de acción de masa, 803
ley de Bragg, 107
ley de Coulomb, 43
ley de Hooke, 221, 665
ley de Ohm, 781-782, 784
ley de Schmid, 237-239
ley de Snell de la refracción de la luz, 857-858
ley de Wolf, 707
liberación de esfuerzos, 386
licuación, 325
lignina, 690, 711
limitaciones de tamaño, 576
límite de fatiga, 284
límite de resistencia, 284
línea de separación, 317, 318, **350**
líneas de deslizamiento, 229-231
líneas de solvus, 326
lingotes, 363
lingotes homogenizados, 412
lingotes rodados en caliente, 203
lingotes, 412
líquido, 316, **350**
lixidiación selectiva, 757-758, 771
longitud de calibración, 215
longitud de fisura, 288-293
lubricantes, 503
lumen, 688, **711**
luminiscencia, 863-866, **883**
luz
absorción, transmisión y reflexión de, 859-863
refracción de, 856-858
y el espectro electromagnético, 853-856

M

macroestructura del hueso, 703-705
madera, 711
achicamiento de, 694
albura, 686
anillos de crecimiento anual, 686
anillos de crecimiento, 687
árboles deciduos, 686
árboles verdes, 686
capa de cámbium, 686
capas de, 685
celdas de parenquimia, 688
celulosa, 690
condición verde, 692
contenido de húmedad de, 692
corazón de madera, 686
corteza exterior, 686
eje longitudinal (L), 686
eje radial (R), 686
eje tangencial (T), 686
ejes en, 687
elementos de vaso, 689
estampamiento interior, 686
hemicelulosa, 690
lignina, 690
lumen, 688
macroestructura de, 685-695
madera de anillos porosos, 689
madera de poros difusos, 689-690
madera primitiva, 686
maderas blandas, 686, 688
maderas duras, 686, 689
médula 686
microfibrillas, 692
pared primaria, 690
pared secundaria, 690
propiedades de, 692-695
propiedades mecánicas, 692-693
rayos de madera, 688
resistencia mecánica de, 692-693
traqueidas, 688
ultraestructura de pared de celda, 690-692
madera de anillo poroso, 689
madera de corazón, 686, 711
madera de poros difusos, 689-690
madera primitiva, 686
maderas blandas, 688
maderas duras, 689
magnetismo, 894-899
magnetización espontánea, 896-897
magnetización, 892, 907-914, **930**
magnetoestricción, 905, 931
magnetón de Bohr, 897, **930**
manufactura de forma cercana a la red, 200
máquina de fatiga por flexión inversa, 283
marcas de mordaza, 282
marcas de orilla, 282
Marcs Exploration Rover (MER), 5
martemperado (martemplado), 389, 390, **457**

martemplado. Vea martemperado (martemplado)
martensita, 373-378, **456**
cambios luego del atemplado, 388
efecto del contenido de carbón en, 375
martensita de Fe-C
dureza y resistencia de, 376
estructura de, en un escala atómica, 374-375
formación de, mediante templado líquido, 373-374
microestructura de, 374
martensita de listón, 374, 375
martensita de placa, 374, 375
martensita deformada, 444-445
martensita gemela, 444
martillo de forja, 209-211
masa atómica, 26-29
masa sin energía, 128
material cristalino, 73
material de fibra de carbón epóxica prepreg, 668, **710**
material de grano de bordes cúbicos (COE), 911
material ferroeléctrico, **845**
material refractario (cerámico), **641**
material superconductor, 876
materiales, **21**
avances recientes en, 18-20
competencia entre, 16-17
definición, 3
diseño y selección, 20-21
tipos de, 8-15
materiales abrasivos cerámicos, 617-618
materiales aislantes cerámicos, 833, 834
materiales amorfos, 72-73, 113-114, **115**
materiales cerámicos de ingeniería, 573
materiales cerámicos tradicionales, 573
materiales cerámicos, **22**, **640**. *Vea también* cerámicas de ingeniería; compuestos cerámicos simples
materiales compuestos, **22**, **709**
CMC discontinuo (hilo), 700
CMC reforzado por partículas, 700
CMC reforzados de fibra contínua, 700
CMM de fibra discontinua, 698
CMM reforzado por partículas, 698
CMM reforzados de fibra continua, 696
compuestos de matriz cerámica (CMC), 700-703
compuestos de matriz metálica (CMM), 696-700
definición, 649
descripción, 13-15
estructura de panal emparedado, 695
estructuras de emparedado, 695-696
estructuras metálicas forradas, 695-696
fibras para plástico reforzado, 651-657
hilos de carburo de silicio, 698
hueso, 703-708
método de propagación de grietas, 700-701
multidireccional, 660
plásticos reforzados de fibra, materiales de matriz para, 657-658
propiedades de fatiga de, 660
unidireccionales, 660
materiales compuestos de plástico reforzado, 651-657
propiedades mecánicas de aramida para, 655-657
propiedades mecánicas de carbón para, 655-657
propiedades mecánicas de fibra de vidrio para, 655-657
materiales compuestos multidireccionales, 660
materiales compuestos plásticos reforzados con fibras, 658-662
moldeo por compresión para, 672
moldeo por inyección para, 672
proceso de compuesto de moldeo de placa (CMS), 672-674
proceso de moldeo abierto para, 667-671
proceso de moldeo cerrado para, 672-679
proceso de pultrusión continua para, 674
materiales compuestos unidireccionales, 660
materiales de ferritas blandas, 923-924, 927-928
materiales electrónicos, 8, 15, **22**
materiales ferromagnéticos, 889-890, **929**
materiales inteligentes, 18-19
materiales isotrópicos, 217
materiales laminados, 659, **709**
materiales magnéticos blandos, 908-915, **931**
aleaciones de hierro-silicio, 910-911
aleaciones de níquel-hierro descripción, 889
pérdidas de energía para, 909-910
propiedades deseables para, 909
propiedades magnéticas de, 911
materiales magnéticos duros, 915-923, 931
hierros moldeados grises, 457
materiales magnéticos permanentes, 915
materiales metálicos, 8-10, 22
materiales no cristalinos, 73
materiales piezoeléctricos, 840-841
materiales plásticos
deformación y resistencia (reforzamiento) de, 539-546
efecto de la temperatura en la resistencia, 545-546
procesamiento de, 491-498
materiales poliméricos, **22**. *Vea también* elastómeros (hules); plásticos
descripción, 8, 10-11
efecto de, en la resistencia de materiales plásticos, 546-552
escurrimiento plástico de, 546-547
fractura por fragilidad de, 550-552
módulo de escurrimiento plástico de, 548
para resistencia a la corrosión, 765
materiales reforzados con fibra de vidrio, 14, 651
materiales refractarios cerámicos, 619-620
materiales semiconductores, 15
materiales semicristalinos, 113, **116**
materiales superconductores, 875-876
materiales termofraguados, 496-498
materiales termoplásticos, 492-496
materiales y dispositivos inteligentes, 5
matriz compuesta plástica de fibra continua, 662-666
mecánica cuántica, 29, **65**
mecanismo de deslizamiento, 232-233
mecanismo de difusión de vacantes, 177-178
mecanismo de difusión sustitucional, 177-178, **195**
mecanismo intersticial, 177-178
mecanismos de difusión, 177-178, 258
melaminas, 529-530
membranas hidrofóbicas, 554
mer, 473, **558**
meseta, 314
metacrilato de polimetil (MAPM)
cemento de huesos, 556
estructura y propiedades de, 509-510
gráficas de esfuerzo por tensión-deformación para, 539-540
metal de Muntz, 423
metal dúctil en proceso de fatiga, 286-287
metal ferromagnético, 907-909
metales
absorptividad de, 859
conducción eléctrica en, 779
conductividades eléctricas de, 782
corrosión electroquímica de, 720-721
efecto de la temperatura en la resistividad eléctrica de, 787
escurrimiento plástico de, 294-296
esfuerzo y deformación en, 212-217
fatiga de, 281-288
mejoras en el desempeño mecánico de, 303-305
modelo de bandas de energía para, 790-791
potenciales de media celda para, 722
precios ($/lb), 359
puros, energías de activación de autodifusión para, 179
resistividad eléctrica de, 786
ruptura por esfuerzo de, 294-298
metales amorfos, **458**
aplicaciones de, 447-448
mecánica de comportamiento, 447

producción de, 447
propiedades y características, 446-448
metales de transición, 57
metales deformados plásticamente, 249-257
metales nanocristalinos, 259-261, **263**, 305
metales policristalinos, 242-247
metales y aleaciones
extrusión de, 208-209
moldeo de, 201-203
procesamiento de, 201-212
rodamiento en caliente y en frío de, 203-208
metales y aleaciones ferrosos, 8-10, **22**
metales y aleaciones no ferrosas, 8-10, **22**
metalitividades covalentes, 57-58
metalografía óptica, 151-155
método de Czochralski, 136
método de enfriamiento directo, 411
método del tamaño de grano ASTM, 154
métodos de polimerización industriales, 484-486
métodos de polimerización, 484-486
métodos de propagación de fisuras, 700-701
mezclas, 10
microelectrónica, 816-828
microestructura
de maderas blandas, 688
de maderas duras, 689
técnicas experimentales para identificación de, 151-165
microfarad, 832
microfibrillas, 692, **711**
micromáquinas, 18
microscopia de sonda expansiva (SPM), 841
microscopia eléctronica de transmisión de alta resolucion (HRTEM), 159-161
microscopio electrónico de exploración (SEM), 156-158
microscopio electrónico de transmisión (TEM), 158-159
Mobay (policarbonato), 515
modelo de bandas de energía, **844**
para aisladores, 792
para la conducción eléctrica, 790-792
para metales, 790-791
modelo de cadena desdoblada, 488
modelo de micela de franjas, 488
modificadores de red, 623, **641**
módulo de corte, 217
módulo de elasticidad, 217, 221, **262**
módulo de escurrimiento plástico, 548
módulo de tensión específica, 657, **709**
módulo de Young, 221
módulo elástico por tensión, 666
mol, 26
moldeado
aleaciones de alto cobre, 419
aleaciones de cobre-berilio, 424
aleaciones de cobre-zinc, 423
bronces de cobre-estaño, 424
bronces estañados, 424
bronces fosforados, 424
clasificación de, 419-421
correlación de estructuras y dureza en, 409
estructuras formadas durante el envejecimiento de, 407
latón sin corte, 423
metal de Muntz, 423
microestructura de, 408
producción de, 419
propiedades de, 418-419
propiedades mecánicas de, 420-421
reforzamiento por precipitación (endurecimiento) de, 406
moldeo con arena, 416-417
moldeo de bolsa al vacío, **710**
moldeo de compresión, 496-497, 559
para materiales compuestos de plástico reforzado con fibras, 672
moldeo de transferencia, 497-498, **559**
moldeo en moldes, 204
moldeo por drenado, 602
moldeo por inyección, 498, **558**
para materiales compuestos plásticos reforzados con fibra, 672
de termoplásticos, 492-493
moldeo soplado, 494-496, **559**
moldeos industriales, 133-134
molécula de hidrógeno, 49-50
molécula de metano, 54
molécula no saturada, 472
moléculas de etileno
activadas, estructura de enlace covalente de, 472
reacciones de polimerización de, 471-472
moléculas diatómicas, 50-51
moléculas que contienen carbón, 53
momento del dipolo, 59-60
momento magnético, 897-899
monómeros, 471, 476, **558**
monómeros bifuncionales, 476
monómeros trifuncionales, 476
motivo, 74, **115**
movilidades de electrón, 795
movilidades de huecos, 795
mullita, 343

N

nailon, 512-51
nanoelectrónica, 841-842
nanoenjambre, 593
nanomaterial, 5, 19-20
nanotecnología
y reparación de huesos, 708
cerámicas y, 637-639, 703
nanotubo de paredes múltiples (NTPM), 594
nanotubo de una pared (NTUP), 594
nanotubos de carbón, 593-594
Natta, Guilo, 490
Nernst, Walter Hermann, 726
neutralidad eléctrica, 48
neutrones, 25
nitonol, 446
nitruro de boro cúbico, 618
nitruro de silicón (Si_3N_4), 610
niveles de aceptor, 801-802, **844**
niveles de donador, 800, **844**
normalización, 386-387
Noryl, 516-517
notación de línea recta para enlace covalente, 51
notación de punto del electrón, 51
nucleación heterogenea, 131-132
nucleación homogénea, 127, 128
núcleo esférico, 129
nucleos, 127- 132
núcleos de iones positivos, 55, **66**, 793
núcleos estables, 127-132
número cuántico principal, 30, 32, 33
número cuántico secundario, 33
número de Avogadro NA, 26, **65**
número de coordinación (NC), 77, 576, **640**
número de oxidación negativo, 39
número de oxidación positivo, 39
número de tamaño de grano, 154
número del tamaño de grano ASTM, 154, 242
número quántico de espín del electrón mS, 34
números atómicos, 26-29, **65**
números cuánticos, 33-34, **65**
números cuánticos magnéticos, 34
números de código AISI-SAE, 391-392
números de oxidación de elementos, 40

O

obleas de silicio, 188-191
oportunidad, 2
orbitales, 34
orbitales atómicos, 24, 29, **65**
orbitales híbridos, 51, **66**
orden de alcance largo (ORL), 73, 623
orden de corto alcance (OCA), 73
orden de la difracción, 107
oxidación
de metales, 759-763
mecánica de, 761-762
oxidación local, 825
oxidación selectiva, 825
óxidos intermedios, 624, **641**
óxidos que forman vidrio, 623, **641**
óxidos que modifican vidrio, 623-624
óxidos superconductores, 881-882

P

palanca, 319
par de iones
  energías interiónicas para, 46-47
  fuerzas interiónicas para, 43-46
par galvánico, 724
paramagnetismo, 895, **930**
parámetro de Larsen-Miller (L.M.), 298-300
pared de dominio, 904
pared primaria, 690
pared secundaria, 690
parisón (?), 494
paro térmico horizontal, 329
paro térmico, 349
pasivación, 742, **771**
paso de difusión de entrada, 824
paso unitario de deslizamiento, 233
pasos de polimerización en cadena, 473-475
Pauli, Wol fgang, 34
Pauling, Linus Carl, 63
pedernal, 606
películas de óxido protector, 759
pensado en caliente de cerámicas, 602
pérdidas de energía por corrientes parásitas, 910, **931**
pérdidas de energía por histérisis, 909-910, 931
perlita, 366, **456**
permeabilidad magnética, 893, **930**
permeabilidad relativa, 893, **930**
perovskita (CaTiO3), 590-591
peróxido de metil etilo ketone (MEK), 528
peso molecular promedio, 475-476
petróleo, 484
picadura, 686
picofarad, 832
pigmentos, 504
placa, 202
placa de cámbium, 686, 711
placa de hueso de compresión, 451
placas, 361
placas de hueso, 450, 451
Planck, Max Ernst, 30
plano de duplicación, 240
planos basales, 94
planos cristalinos, 114
planos cristalográficos
  en celdas unitarias hexagonales, 93-95
  índices miller para, en celdas unitarias cúbicas, 88-93
planos de clivaje, 273, 274
planos de deslizamiento, 230
planos de empaquetamiento cerrado, 114
planos de prisma, 94
planos de una familia o forma, 89
planos y direcciones de deslizamiento, 237
plasticizadores, 503-504, **559**
plástico reforzado con fibra de carbón (PRFC), 21
plásticos, 469, 653. Vea también termoplásticos; plásticos termofraguantes (termoestables)
plásticos, 546-552
  comportamiento viscoelástico, 546
  fractura de, 550-552
  producción plástica de, 552
  relajación de esfuerzos de, 547-549
plásticos reforzados con fibras, **709**
plásticos reforzados, 653-654
plásticos reforzados, 655-657
  producción de, 651
  propiedades de, 653
  para resinas plásticas de reforzamiento, 651-653
plásticos termofraguados (termoestables), 521-531, **558**
  descripción, 469-470
  fenólicos, 523-525
  poliésteres no saturados, 527-529
  precios en masa de, 522
  propiedades de, 522-523
  reforzamiento de, 545
  resinas de amino (ureas y melaminas), 529-530
pliegue laminado (lámina), 710
pliegues, 668
polarización, 739, 845
polarización, **845**
polarización catódica, **770**
polarización de activación, 740, **771**
polarización de concentración, 740-741, **771**
polarización directa, 845
polarización inversa, 845
poliacrilonitrilo (PAN)
  a partir de fibras de carbón, 654
  propiedades de, 506-507
  estructura y propiedades de, 506-507
  estructura de, 506
poliamidos (nilons), 512-515
  estructura y propiedades de, 513-514
  unión de amida, 513
policarbonatos, 515-516
policlorotrifluoroetileno (PCTFE), 511
poliésteres no saturados
  estructura y propiedades de, 529
  peróxido de metil etil ketona (MEK), 528
  poliéster lineal, 528
poliésteres termoplásticos
  estructuras y propiedades de, 518
  polibutileno tereftalato (PBT), 518
  polisulfona, 518-519
poliestireno (PS), 505-506
  curvas de escurrimiento plástico para, 547
  datos de esfuerzo por tensión-deformación para, 544
  estructura y propiedades de, 506
poliestireno lineal, 528
poliestireno moldeable, 658
polieterimida, 520-521
polietileno (PE)
  aplicaciones de, 502
  curvas de esfuerzo de tensión-deformación para baja y alta densidad, 542
  enlace covalente, 472
  estructura y propiedades de, 501-502
  propiedades de, 502
  reacción general para la polimerización de, 473
  tipos de, 500-501
polietileno de baja densidad lineal (LLDPE), 501
polietileno tereftalato (PET), 518
polietilenos de alta densidad, 500-501, 502
polietilenos de baja densidad, 500-501, 502
poligonización, 252
polimerización, **558**
  de polietileno, reacción general para, 473
  grado de, 473
  iniciación de, 473-475
  otros métodos de, 482-483
  propagación de, 473, 475
  terminación de, 473, 475
polimerización de crecimiento en cadena, 471
polimerización de emulsión, 485
polimerización de etapa larga, 482, **558**
polimerización de masa, 484, 558
polimerización de reacción en cadena, 480
polimerización de red, 482
polimerización de soluciones, 485, **558**
polimerización de suspensión, 485, **558**
polimerización en cadena, 472, **558**
polímero, 469, 471
polímero en cadena, **558**
polímero hidrofílico, 554, **559**
polímeros, 113
polímeros biodegradables, 553, **559**
polímeros (biopolímeros), 552-557
polímeros de vinil, 478-479
polímeros de vinilideno, 478-479
polímeros lineales no cristalinos, 476-477
polimorfismo, 102-103, 114, **116**
polipropileno, 505
polisopreno cis 1,4, 531, **559**
polisopreno trans 1,4, 532, **559**
polisulfona, 519
politetrafluoroetileno (PTFE)
  estructura y propiedades de, 510-511
  procesamiento de, 511
por fatiga, 284
porcelana eléctrica, 834-835
porosidad, 613
portadores de carga, 806-807

portadores mayoritarios, 803, 844
portadores minoritarios, 803, 945
potenciales de electrodo, 723
potenciales de media celda, 722
potenciostato, 769
precipitado coherente, 407
precipitado incoherente, 407
precursores, 654
preforma, 874
prensado en seco, 600, **641**
prensado isostático en caliente (HIP), 638
prensado isostático, 600, **641**
preparación de materiales, 599
primera ley de difusión de Fick, 181, **195**
principio de exclusión de Pauli, 34, **65**
principio de incertidumbre de Heisenberg, 32, **65**
principio de Pauli, 790
procesamiento
  de cerámicas, 598-603
  de formas de productos de acero y de fabricación de acero, 361-362
  de materiales plásticos, 491-498
  de metales y aleaciones, 201-212
  de politetrafluoroetileno (PTFE), 511
  para materiales termofraguables, 496-498
  y procesos para materiales termoplásticos, 492-496
proceso autocatalítico, 748
proceso de aplicación manual de capa de refuerzo, 667, **710**
proceso de Bayer, 411
proceso de bolsa-autoclave al vacío, 668-670
proceso de compuesto de moldeo de placa (SMP), 672-674
proceso de depositación de vapor química (DVQ), 825
proceso de devanado de filamentos, 670-672, **710**
proceso de fatiga, 286-287
proceso de moldeo abierto, 667-671
proceso de moldeo cerrado, 672-679
proceso de moldeo, 416
proceso de plano, 803
proceso de pultrusión continua, 674
proceso de recocido, 386
proceso de rocío, 667-668, **710**
proceso de velocidad, 173-176
proceso de vidrio flotante, 628
procesos de difusión, 184-191
procesos de formación de metales, 211-212
producción plástica, 552
producto de aleaciones forjadas, 202
producto de energía máximo (BH), 916, **931**
productos de descomposición, 404
productos moldeables, 202
propagación de fisuras, 272
propagación de grietas por fatiga
  correlación de, con esfuerzo y longitud de grieta, 288-293
  velocidad de, 288-293
propagación de polimerización, 473, 475
propiedades anisotrópicas, 592
propiedades de fatiga de materiales compuestos, 660
propiedades de ingeniería de aluminio, 410
propiedades eléctricas
  de materiales aislantes cerámicos, 833
  de semiconductores intrínsecos, 829
propiedades isotrópicas, 216, 592
propiedades mecánicas. Vea también propiedades de aramida para materiales compuestos plásticos reforzados, 655-657
  de aceros al medio carbón, 391-392, 393
  de aceros de baja aleación, 401, 402
  de aceros inoxidables, 426
  de aceros inoxidables austeníticos, 426
  de aceros inoxidables endurecidos por precipitación, 426
  de aceros inoxidables ferríticos, 426
  de aceros inoxidables martensíticos, 426
  de aleaciones de aluminio forjadas, 414
  de aleaciones de aluminio modeables, 414
  de aleaciones de cobre, 420-421
  de aleaciones de magnesio forjadas, 437-438
  de aleaciones de magnesio moldeadas, 437-438
  de aleaciones de níquel, 437-438
  de aleaciones de titanio, 437-438
  de carbón para materiales compuestos plásticos reforzados, 655-657
  de cerámicas, 611-613
  de cerámicas de ingeniería, 610
  de CMM reforzados con fibra continua, 697
  de compuestos de matriz cerámica reforzada de hilos de SiC, 701
  de fibras de vidrio para materiales compuestos plásticos reforzados, 655-657
  de hierro dúctil, 430
  de hierro moldeable gris, 430
  de hierro moldeable maleable, 430
  de huesos, 705-706
  de madera, 692-693
  obtenidas a partir del diagrama de esfuerzo-deformación de ingeniería, 220-225
  obtenidas de pruebas de tensión, 220-225
propiedades. *Vea también* propiedades mecánicas
  de acetales, 517
  de terpolímeros de acrilonitrilo-butadieno-estireno (resinas ABS), 507-508
  de aluminio, 410-411
  de metales amorfos, 446-448
  de hierros fundidos, 429
  de poliéster fundido, 658
  de laminado compuesto de fibras de carbón y resina epóxica, 659
  de aleaciones de cobre, 418-419
  de hierro dúctil, en función de la dureza, 434
  de elastómeros (hules), 534
  de termoplásticos de ingeniería, 511-512
  de resina epóxicas, 526, 658
  de compuestos de fibra de vidrio-poliestireno, 659
  de termoplásticos de propósito general, 499
  de germanio, 795
  de fibras de vidrio, 653
  de polietilenos de baja y alta densidad, 502
  de aleaciones de magnesio, 437-438
  de resinas de melamina-formaldehído, 530
  de hule natural, 533-534
  de fenólicos, 524
  de resinas basadas en óxido de fenileno, 516-517
  de poliacrilonitrilo, 506-507
  de poliamidas (nilons), 513-514
  de policarbonatos, 515-516
  de elastómeros de policloropreno, 536
  de policlorotrifluoroetileno (PCTFE), 511
  de polietileno (PE), 502
  de polipropileno, 505
  de poliestireno, 506
  de polisulfona, 519
  de politetrafluoroetileno (PTFE), 510-511
  de cloruro de polivinil (PVC), 503
  de silicio, 795
  de copolímeros de estireno-acrilonitrilo (resinas SAN), 507
  de poliésteres termoplásticos, 518
  de plásticos termofraguados (termoestables), 522-523
  de poliésteres no saturados, 529
  de madera, 692-695
propiedades térmicas de cerámicas, 618-620
proporción agua-cemento, 680
protección anódica, 768-769, **771**
protección catódica, 768, **771**
protección contra esfuerzos, 455, 636, 642
prótesis, 634
prótesis de cadera total, 635
prótesis de sustitución de rodilla, 452
protones, 25
prueba de dureza, 227-228
prueba de dureza de templado extremo, 397, 398

prueba de dureza Vickers, 228-229
prueba de escurrimiento plástico, 296-297
prueba de impacto y tenacidad, 276
prueba de microdureza Vickers, 242
prueba de ruptura por esfuerzo, 297-298
prueba de templabilidad de Jominy, 396, **457**
prueba de tenacidad de fractura, 280, 614
prueba de tensión, 217-227
prueba por ruptura de escurrimiento plástico, 297-298
pruebas de dureza de Brinell, 228-229
pruebas de dureza Knoop, 228-229
pruebas de dureza Rockwell, 228-229
puenteo de fisuras, 700-701
pultrusión, 710
punto de ablandamiento, 627, **641**
punto de deformación, 628, **641**
punto de recocido, 627, **641**
punto de trabajo, 627, **641**
punto eutéctico, 327, **350**
punto triple, 311
puntos de referencia de vidrio (temperatura), **641**
puntos de retícula, 74, **115**
puntos invariantes, 313, 316

Q

quartz, 597, 606

R

radiación
  coherente, 866
  emisión estimulada de, 866-870
  incoherente, 866
radiación coherente, 866
radiación incoherente, 866
radical libre, 473
radio crítico en función del subenfriamiento, 129-130
radios iónicos, 47
rayos de madera, 688, 711
razón c/a, 82
reacción anódica, 721
reacción catódica, 721
reacción de oxidación, 721
reacción de reducción, 721
reacción eutéctica (en diagramas de fase binarios), 350
reacción eutéctica, 364-365
reacción monotéctica, 338, **350**
reacciones de corrosión, 739
reacciones de hidratación, 677, **711**
reacciones de oxidación-reducción, 720-721
reacciones de polimerización de condensación, 482
reacciones de polimerización, 471-483
reacciones del cátodo, 728
reacciones eutectoides, 341, 364-365
reacciones invariantes, 327, 339-341, **350**, **351**, 364-365
reacciones peritécticas, 333, **350**
reacciones peritectoides, 341
reactividad química, 39-41
recipiente de madera, 711
recocido, 262, 263
  cambios durante, 249
  de aceros al medio carbón, 386-387
  durante el rodado en frio, 206
  intervalos de temperatura para aceros al medio
recocido (de un material cerámico), 598, 641
recocido continuo, 255
recocido magnético, 918, **931**
recocido parcial, 249
recocido total, 249
recristalización secundaria, 305
recristalización, 249, 252-257, 263
rectificación, 813
recubrimientos, 765-766
recubrimientos cerámicos e ingeniería de superficies, 632-634
recubrimientos de carburo, 632-634
recubrimientos de óxido, 632-634
recubrimientos inorgánicos (cerámicas y vidrio), 766
recubrimientos metálicos, 765-766
recubrimientos orgánicos, 766
recuperación, 279, 251-252, **263**
recuperación y recristalización de metales deformados plásticamente, 249-257
red suelta, 623
redes de silicato, 597-598
reducción de frío porcentual, 206, **262**
reducción porcentual en área, 224
refinadores de grano, 132
reflectividad, 859
reflexión
  de luz mediante una placa de vidrio, 860-861
  de luz, 859-860
reforzados, 655-657
reforzamiento
  aumentando la cantidad de cristalinidad en un material termoplástico, 541-545
  de plásticos termofraguados (termoestables), 545
  de termoplásticos debido a la masa molecular promedio de las cadenas de polímeros, 541
  de termoplásticos enlazando firmemente átomos polares sobre las cadenas de carbón principales, 543
  de termoplásticos incrementando la cantidad de cristalinidad en un material termoplástico, 541
  de termoplásticos introduciendo anillos de fenileno en la cadena de polímeros principal, 544
  de termoplásticos introduciendo grupos atómicos complemento en las cadenas de carbón principales, 542
  de termoplásticos mediante la adición de fibras de vidrio, 544-545
  de termoplásticos mediante la introducción de átomos de oxígeno y hidrógeno en la cadena de carbón principal, 543
  debido a la masa molecular promedio de las cadenas de polímero, 541-545
refractarios, 343, 619
refractarios ácidos, 620
refractarios básicos, 620
refractarios de alta alumina, 620
refractarios de sílice, 620
región de agotamiento, 810
región de paro térmico, 314
regla de la fase de Gibbs, 313-314, **349**
regla de la palanca, 318-319, **350**
regla de mezclas, 663
reglas de Hume-Rothery, 138, 316
relación de Hall-Petch, **263**
relajación de esfuerzos de materiales poliméricos, 547-549
rellenadores, 504, **559**
remodelado de hueso, 707- **711**
reparación de hueso, 708
resina epóxicas reforzadas con fibra de carbón, 659
resinas basadas en óxido de fenileno, 516-517
resinas de aminio (ureas y melaminas), 529-530
resinas de melamina-formaldehído, 529-530
resinas de poliéster reforzadas con fibra de vidrio, 658
resinas de urea-formaldehído, 529-530
resinas epóxicas, 525-527
  estructura de, 526
  estructura y propiedades de, 526
  propiedades de, 526, 658
resinas plásticas de refuerzo
  fibras de aramida para, 654-655
  fibras de vidrio para, 651-653
resistencia a la corrosión
  alteración del ambiente para, 767-768
  diseño para, 766-767
  materiales poliméricos para, 765
  selección de materiales para, 765
resistencia a la precipitación (endurecimiento)
  de aleaciones de cobre, 406
  de aleaciones binarias, 403-410
resistencia a la ruptura dieléctrica, 831
resistencia a la ruptura por la escurrimiento plástico, 306
resistencia a la tensión última (RTU), 222-223, 262
resistencia a la tensión, 223

resistencia cedente de compensación de 0.2%, 221-222
resistencia cedente de compensación, 221
resistencia de ruptura por esfuerzo, **306**
resistencia de tensión específica, 657, 709
resistencia dieléctrica, 833, 845
resistencia eléctrica, 782, **843-844**
resistencia por fatiga, 287-288
resistencia producida, 221, 262
resistencia, mejoras en, 303-305
resistividad eléctrica, 782, 786, 787, **844**
respuesta bioactiva, 637
respuesta de resorción (disolución), 637
respuesta inactiva biológicamente, 636
respuesta tóxica, 636
restricciones de neutralidad de carga, 56
restricciones de par de electrones, 56
retícula de martensita, 377
retícula espacial, 73-74, 114, 115
retículas cristalinas cúbicas centradas en las caras (FCC), 584-586
retículas cristalinas de empaquetamiento cerrado hexagonal (HCP), 584-586
retículas cristalinas, 584-586
retículas y sistemas cristalinos de bravais, 74-75
rodado en caliente
de lingotes de placa, 203
de tira de acero, 362
rodado en frío,
a temperatura de nitrógeno líquido, 304
de placa metálica, 206
rugosidad de la superficie, 288
ruptura por esfuerzo, 294-298

S

secado y eliminación de aglutinante, 604
sección isotérmica, 346, 347
segunda ley de difusión de Fick, 182, **195**
semiconductividad intrínseca, 797-799
semiconductor extrínseco tipo n, **844**
semiconductor extrínseco tipo p, **844**
semiconductores, 792, **844**, 862
semiconductores cerámicos, 836-837
semiconductores compuestos, 828-830
semiconductores elementales intrínsecos
diagrama de bandas de energía para, 794-795
relaciones cuantitativas para la conducción eléctrica, 795-796
semiconductores extrínsecos, 799-809
concentraciones de portadores en, 804-805
densidades de carga en, 803-804
efecto de impurificación en las concentraciones de portadores en, 803-804
efecto de la temperatura en la conductividad eléctrica de, 807-808
impurificación de, 803
tipo n (Tipo Negativo), 799-801
tipo p (tipo de portador positivo), 803
tipo p (Tipo Positivo), 801-802
semiconductores intrínsecos, 792-799, **844**
concentración de portadores en, 804
propiedades eléctricas de, 829
mecanismo de conducción eléctrica en, 792-793
serie de fuerzas electromotrices, **770**
serie galvánica (agua de mar), **771**
serie galvánica, 743-744
sílice, 597-598
sílice-leucita-mullita, 608
sílice (pedernal), 606
silicio, 795
silicones, 537
siloxano de polidimetil, 537
sinterizados asistido con presión, 638
sistema, **349**
sistema Al_2-SiO_2, 343
sistema de dos componentes, 315
sistema de hierro-carbón, 363-372
sistema de inspección de fisuras, 289
sistema de liberación de droga, 555-556
sistemas cristalinos y retículas de bravais, 74-75
sistemas de aleaciones
eutéctico binario, 326-333
isomorfo binario, 315-318
peritéctico binario, 333-338
sistemas de aleaciones eutécticas binarias, 326-333
sistemas de aleaciones isomorfas binarias, 315-318
sistemas de aleaciones peritécticas binarias, 333-338
sistemas de deslizamiento, 234-235, **262**
en cristales individuales metálicos, 238
en estructuras cristalinas, 236
sistemas de difusión de soluto-solvente, 182
sistemas de difusión, 182
sistemas isomorfos, 316, **350**
sistemas microelectromecánicos (SMEM), 5, 18
sistemas monotécticos binarios, 338-339
sitios intersticiales
octaédrico, 584
retículas cristalinas en FCC, 584-586
retículas cristalinas en HCP, 584-586
tetraédrico, 584
sitios intersticiales octaédricos, 584, **640**
sitios intersticiales tetraédricos, 584, **640**
solenoide, 892
solidificación
calor latente de, 135
de cristales individuales, 134-138
de termoplásticos no cristalinos, 486-488
de termoplásticos parcialmente cristalinos, 486
solidificación de no equilibrio, 322-325
sólido cristalino, 72-73
sólidos, 316, **350**
difusión atómica en, 177-184
difusión en, 177
efecto de la temperatura en la difusión en, 191-195
procesos de velocidad en, 173-176
sólidos de no equilibrio, 323
sólidos enlazados iónicamente, 576-579
sólidos iónicos
arreglo geométrico de iones en, 48
arreglos de iones en, 47-48
energías de enlace de, 48-49
neutralidad eléctrica de, 48
solución sólida, 138
soluciones de sólidas intersticiales, 141-142, 247
soluciones intersticiales, 138
soluciones sólidas metálicas, 1383-142
soluciones sólidas supersaturadas, 404
soluciones sólidas sustitutionales, 138-141, 247
soluciones sólidas terminales, 326
soluciones sustitucionales, 138
solucionización, 403
solvus, **350**
Spirit, 2
subenfriamiento en función del radio crítico, 129-130
superaleaciones, 8-10, 17
superconductividad, 876
superconductor tipo I, **883**
superconductor tipo II, **883**
superconductores
alta corriente, alto campo, 879-880
flujo de corriente y campos magnéticos en, 878-879
propiedades magnéticas de, 876-877
superconductor tipo I, 877-878
superconductor tipo II, 877-878
superplasticidad, 257-259, **263**
susceptibilidad magnética, 893-894, **930**
suspensión electrodinámica (SED), 889
suspensión electromagnética (SEM), 889

T

tabla periódica de los elementos, 27
tamaño atómico, 35
tamaño crítico, 128
tamaño de grano ASTM, 151-155
técnicas experimentales
metalografía óptica, 151-155
microscopia de exploración de electrones (SEM), 156-158
microscopia de transmisión de electrones (TEM), 158-159

para identificación de microestructura y defectos, 151-165
tecnología de fabricación de circuitos integrados MOS, 825-826
tecnología MOSFET, 820-821
tejidos compactos (hueso), 703
tejidos corticales (hueso), 705-706
tejidos trabeculares (hueso), 703, 705
temperatura
efecto de, en energía absorbida luego del impacto, 277
efecto de, en la resistencia a la tensión de termoplásticos, 546
efecto de, en la resistencia de materiales plásticos, 545-546
transición de dúctil a frágil, 276-278
temperatura crítica, 876, **883**
temperatura de acabado de martensita, 374, **457**
temperatura de atemplado, 389
temperatura de Curie, **930**
dominios ferroeléctricos, 838
de un material ferroeléctrico, **845**
de un material ferromagnético, 900
temperatura de energía de impacto, 278
temperatura de inicio de martensita, 383, **457**
temperatura de inicio de transformación de martensita, 374
temperatura de transición de vidrio (T_g), 486, 488, **641**
en polímeros, **558**
vidrios, 622-623
temperatura eutéctica, 327, **350**
temperatura eutectoide de acero, 395-396
temperaturas superconductores críticas, 876
templabilidad, 396-401, 457
templado, 373-374, 404
tenacidad
de materiales cerámicos, 613-615
y prueba de impacto, 276
tenacidad de fractura, 279-281
tendones, 683
teoría de absorción, 742
teoría de película de óxido, 742
teraftalato polibutileno (TPB), 518
terminación de polimerización, 473, 476
termistor, **845**
termoformación, 496
termoplásticos, 546
cloruro de polivinil (PVC), 544
cristalinidad y estereoisomerismo en, 486-490
descripción, 469-470
efecto de la temperatura sobre la tensión producida por resistencia de, 546
estereoisomerismo en, 489-490
extrusión de, 493-494
masas moleculares y grados de polimerización para, 541
mecanismos de deformación de, 539-541
moldeo mediante soplado de, 494-496
moldeo por inyección de, 492-493
para poliestireno (PS), 544
peso molecular promedio de, 475-476
propósito general, 498-511
reforzamiento de, 541-545
temperatura de transición del vidrio (T_g), para, 488
termoformación de, 496
termoplásticos de ingeniería, 511-521
termoplásticos, **558**
termoplásticos de ingeniería, 511-521
acetales, 517
policarbonatos, 515-516
poliésteres termopláticos, 518-519
propiedades de, 511-512
resinas basadas en óxido de fenileno, 516-517
sufuro de polifenileno (SPFL), 520-521
termoplásticos de propósito general
acrílicos, 509-510
cloruro de polivinil (PVC), 503-504
copolímeros de estireno-acrilonitrilo (resinas SAN), 507
fluoroplásticos, 510-511
metacrilato de polimetil (MAPM), 509-510
polietileno (PE), 500-502
polietileno de baja densidad lineal (PEBDL), 501
politetrafluoretileno (PTFE), 510-511
propiedades de, 499
resistencia de impacto al mellado, 499
terpolímeros de acrilonitrilo-butadieno-estireno (resinas ABS), 507-508, 509
ventas y precios de, 498
termoplásticos no cristalinos, 486
termoplásticos parcialmente cristalinos
estructura de, 488-489
solidificación de, 486-488
terpolímeros de acrilonitrilo-butadino-estireno (resinas ABS)
aplicación de, 509
estructuras y propiedades de, 507-508
Tesla, Nikola, 892
tiempo de envejecimiento, 405
tiempo de relajación, 548-549, 785
tira de acero, 362
tirador de fibras, 700-701
trabajo en caliente de metales, **262**
trabajo en frío, 246
trabajo en frío de metales, 262
transductor, **845**
transformación dividida, 385
transformación sin difusión, 374
transistor de efecto de campo, 819
transistor de union bipolar (BJT), 815-816, **845**
transistor de unión bipolar npn, 815
transistores bipolares planos microelectrónicos, 818
transistores de efecto de campo de semiconductor metálico (MESFETs), 830
transistores de efecto de campo plano microelectrónicos, 819-821
transmisión
de luz por una placa de vidrio, 860-861
de luz, 859-860
transporte civil de alta velocidad (HSCT), 3
transporte de carga eléctrica, 793-794
traqueidas (longitudinales), 688, 711
tratamiento de grafitización, 654
tratamiento térmico, 435
tratamiento térmico de soluciones, 403
tratamiento térmico homogenizado, 324
tratamientos térmicos de cerámicas, 604-606
trenes magnéticamente levitados (maglev), 888
tridimita, 597

U

Ultem (polieterimida), 520-521
ultraestructura de pared de celda, 690-692
umbral de intervalo de factor de intensidad de esfuerzo, 292
unidad de masa atómica (u), 26, **65**
unidades adimensionales, 215
unidades de debye, 60
unión pn, 810-811, 845
ureas, 529-530

V

valores de fractura-tenacidad, 281
válvula del corazón artificial, 553
vectores de Burgers, 145, 147
vectores de deslizamiento, 145, 147
velocidad de arrastre, 779, 784
velocidad de corrosión controlada anódicamente, 741
velocidad de corrosión controlada catódicamente, 741
velocidad de crecimiento de grietas por fatiga, 289, 290-292, **306**
velocidad de enfriamiento crítica, 385
velocidad de escurrimiento plástico mínima, 295
velocidad de escurrimiento plástico, 294, 295, 306
velocidades (cinéticas) de corrosión, 735-744
velocidades (cinéticas) de oxidación, 762-763
vida por fatiga, 283, **306**
vidriado, 632, 642
vidrio atemplado térmicamente, **641**

vidrio de red modificada (vidrio de sosa-cal), 624
vidrio de silice fundida, 624-625
vidrio de sosa-cal, 626
vidrio flotante, **641**
vidrio inorgánico, 113
vidrio químicamente templado, **641**
vidrio s, 651
vidrios, 620-632, **641**
composiciones de, 624-625
definición, 622
deformación viscosa de, 626-628
efecto de la temperatura en las viscosidades de, 627
estructura de, 623-624
lehr, 629
métodos de formación para, 628-630
modificadores de red, 623
orden de largo intervalo, 623
óxidos intermedios en, 624
óxidos que forman vidrio, 623
óxidos que modifican vidrio, 623-624
placa de formación y vidrio de placa, 628-630
proceso de vidrio flotante, 628
punto de ablandamiento, 627
punto de deformación, 628
punto de recocido, 627
punto de trabajo, 627
red suelta, 623
reforzados químicamente, 630-631
soplado, prensado y fundido de, 629-630
temperatura de transición de vidrio, 622-623
templado, 630
térmicamente templado, 631
vidrios de borosilicato, 626
vidrios de plomo, 626
vidrios de silicato, 632, 859-860
vidrios metálicos, 113, **116**, 446, 911-912
viscoelasticidad, 707, **711**
vitrificación, 605, **641**
vulcanización, 532, 559

W

whiteware triaxial, 607
whitewares, 607

Y

Young, Thomas, 221

Z

Ziegler, Karl, 490
zirconia (ZrO_2)
cerámicas de ingeniería, 610
descripción, 20
estabilizada completamente, 615
estabilizada parcialmente, 615
zirconia completamente estabilizada, 615
zirconia estabilizada parcialmente (ZEP), 615
zonas de precipitación (zonas GP), 404
zonas GP. Vea zonas de precipitación (zonas GP)
zonas GP1, 407
zonas GP2, 407
zonas teta, 407

Constantes

Constante	Símbolo	Valor
Aceleración gravitacional	g	9.806 m/s
Carga electrónica (magnitud)	e	1.602×10^{-19} C
Constante de Boltzmann	k	8.620×10^{-5} eV/K
Constante de gas	R	1.987 cal/(mol · K); 8.314 J/(mol · K)
Constante de permeabilidad	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ T · m/A
Constante de permitividad	ϵ_0	8.854×10^{-12} $C^2/(N \cdot m^2)$
Constante de Planck	h	6.626×10^{-34} J · s
Densidad del agua		1 g/cm^3 = 1 Mg/m^3
Faraday	F	9.6485×10^4 C/mol
Magnetón de Bohr	μ_B	9.274×10^{-24} A · m^2
Masa del electrón	m_e	9.110×10^{-28} g
Número de Avogadro	N_0	6.023×10^{23} mol^{-1}
Unidad de masa atómica	u	1.661×10^{-24} g
Velocidad de la luz	c	2.998×10^8 m/s

Factores de conversión

Longitud:	1 pulg. = 2.54 cm = 25.4 mm 1 m = 39.37 in 1 Å = 10^{-10} m
Masa:	1 lbm (libra-masa) = 453.6 g = 0.4536 kg 1 kg = 2.204 lbm
Fuerza:	1 N = 0.2248 lbf (libra-fuerza) 1 lbf = 4.44 N
Esfuerzo:	1 Pa = 1 N/m^2 1 Pa = 0.145×10^{-3} $lbf/pulg^2$ 1 lbf/in^2 = 6.89×10^3 Pa
Energía:	1 J = 1 N · m 1 cal = 4.18 J 1 eV = 1.60×10^{-19} J
Potencia:	1 W = 1 J/s
Temperatura:	°C = K − 273 K = °C + 273 °C = (°F − 32)⁄1.8
Corriente:	1 A = 1 C/s
Densidad:	1 g/cm^3 = 62.4 lbm/ft^3
$\ln x = 2.303 \log_{10} x$	

Lista de los elementos con sus símobolos y masas atómicas*

Elemento	Símbolo	Número atómico	Masa atómica†
Actinio	Ac	89	(227)
Aluminio	Al	13	26.98
Americio	Am	95	(243)
Antimonio	Sb	51	121.8
Argón	Ar	18	39.95
Arsénico	As	33	74.92
Ástato	At	85	(210)
Azufre	S	16	32.07
Bario	Ba	56	137.3
Berilio	Be	4	9.012
Berkelio	Bk	97	(247)
Bismuto	Bi	83	209.0
Borion	Bh	107	(262)
Boro	B	5	10.81
Bromo	Br	35	79.90
Cadmio	Cd	48	112.4
Calcio	Ca	20	40.08
Californio	Cf	98	(249)
Carbono	C	6	12.01
Cerio	Ce	58	140.1
Cesio	Cs	55	132.9
Cloro	Cl	17	35.45
Cobalto	Co	27	58.93
Cobre	Cu	29	63.55
Curio	Cm	96	(247)
Cromo	Cr	24	52.00
Disprosio	Dy	66	162.5
Dubnio	Db	105	(260)
Einsteinio	Es	99	(254)
Erbio	Er	68	167.3
Escandio	Sc	21	44.96
Estaño	Sn	50	118.7
Estroncio	Sr	38	87.62
Europio	Eu	63	152.0
Fermio	Fm	100	(253)
Flúor	F	9	19.00
Fósforo	P	15	30.97
Francio	Fr	87	(223)
Gadolinio	Gd	64	157.3
Galio	Ga	31	69.72
Germanio	Ge	32	72.59
Hafnio	Hf	72	178.5
Hasio	Hs	108	(265)
Helio	He	2	4.003
Hidrógeno	H	1	1.008
Hierro	Fe	26	55.85
Holmio	Ho	67	164.9
Indio	In	49	114.8
Iridio	Ir	77	192.2
Kriptón	Kr	36	83.80
Lantano	La	57	138.9
Laurencio	Lr	103	(257)
Litio	Li	3	6.941
Lutecio	Lu	71	175.0
Magnesio	Mg	12	24.31
Manganeso	Mn	25	54.94
Meitnerio	Mt	109	(266)
Mendelevio	Md	101	(256)
Mercurio	Hg	80	200.6
Molibdeno	Mo	42	95.94
Neodimio	Nd	60	144.2
Neón	Ne	10	20.18
Neptunio	Np	93	(237)
Niobio	Nb	41	92.91
Níquel	Ni	28	58.69
Nitrógeno	N	7	14.01
Nobelio	No	102	(253)
Oro	Au	79	197.0
Osmio	Os	76	190.2
Oxígeno	O	8	16.00
Paladio	Pd	46	106.4
Plata	Ag	47	107.9
Platino	Pt	78	195.1
Plomo	Pb	82	207.2
Plutonio	Pu	94	(242)
Polonio	Po	84	(210)
Potasio	K	19	39.10
Praseodimio	Pr	59	140.9
Prometio	Pm	61	(147)
Protactinio	Pa	91	(231)
Radio	Ra	88	(226)
Radón	Rn	86	(222)
Rhenio	Re	75	186.2
Rodio	Rh	45	102.9
Rubidio	Rb	37	85.47
Rutenio	Ru	44	101.1
Rutherfordio	Rf	104	(257)
Samario	Sm	62	150.4
Seaborgio	Sg	106	(263)
Selenio	Se	34	78.96
Silicio	Si	14	28.09
Sodio	Na	11	22.99
Talio	Tl	81	204.4
Tántalo	Ta	73	180.9
Tecnecio	Tc	43	(99)
Telurio	Te	52	127.6
Terbio	Tb	65	158.9
Titanio	Ti	22	47.88
Torio	Th	90	232.0
Tulio	Tm	69	168.9
Tungsteno	W	74	183.9
Uranio	U	92	238.0
Vanadio	V	23	50.94
Xenón	Xe	54	131.3
Yodo	I	53	126.9
Yterbio	Yb	70	173.0
Ytrio	Y	39	88.91
Zinc	Zn	30	65.39
Zirconio	Zr	40	91.22

*Todas las masas atómicas tienen cuatro cifras significativas. Estos valores los recomienda el Committee on Teaching of Chemistry, International Union of Pure and Applied Chemistry.

†Los valores aproximados de la masa para los elementos radiactivos se indican entre paréntesis.

Fuente: Chang, R., *Chemistry,* McGraw-Hill, 2002.